

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Aplicación de hormigón de alta resistencia y fibras poliméricas a elementos tipo viga experimentales.

Francisco Xavier Calderón Cifuentes

Fabricio Yépez, Ph.D., Director de Tesis

Tesis de Grado presentada como requisito
para la obtención del Título de Ingeniero Civil

Quito, abril de 2015

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Aplicación de hormigón de alta resistencia y fibras poliméricas a elementos tipo viga
experimentales.**

Francisco Xavier Calderón Cifuentes

Fabricio Yépez, Ph.D.,
Director de Tesis

Fernando Romo, M.Sc.,
Director de Ingeniería Civil
Miembro del Comité de Tesis

Eva Lantsoght, Ph.D.,
Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdova, Ph.D.,
Decana de la Escuela de Ingeniería

Quito, abril de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Francisco Xavier Calderón Cifuentes

C. I.: 1718302068

Lugar y Fecha: Quito, abril de 2015

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Francisco y Betty, y a mis hermanos Michael y Alexis. Todos han sido un ejemplo de trabajo, honestidad y dedicación en mi vida.

Francisco Calderón.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Fabricio Yépez, el director de esta tesis, por su dedicación al aprendizaje de sus alumnos y a la mejora continua del nivel académico de la USFQ. Gracias a su experiencia, liderazgo y empeño la participación de la Universidad en el evento internacional “ACI FRP Composites Competition” fue posible.

Agradezco también a David Chávez, Francisco Játiva, Rubén Mancheno, Roberto Merino, Alex Pacheco, Juan Paz, María Emilia Pontón, Andrés Robalino, y Gustavo Tapia quienes, junto conmigo, representaron a la Universidad en la “ACI SPRING 2013 CONVENTION” llevada a cabo en Minneapolis, USA. Agradezco a la Universidad San Francisco de Quito y a todos mis profesores por el apoyo que nos brindaron para poder participar en la “ACI FRP Composites Competition”.

Agradezco a mis padres por haber hecho siempre de la educación y futuro de sus hijos una prioridad, y a mis hermanos por el apoyo incondicional que siempre nos brindamos.

Francisco Calderón.

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis es detallar el proceso seguido para el diseño y manufactura de una estructura tipo viga, que utiliza hormigón de alta resistencia reforzado con FRP (fiber reinforced polymer), y que cumple con las condiciones impuestas por el concurso “ACI FRP Composites Competition”. Se presenta una investigación bibliográfica de la naturaleza y propiedades de las varillas de FRP y del hormigón de alta resistencia. También se presenta, a manera de guía, el proceso seguido para el desarrollo de una mezcla de hormigón que alcanzó una resistencia de 109.92MPa. Por último se exponen los modelos estructurales utilizados para el diseño de la estructura y modelos nuevos desarrollados para poder explicar el modo de fallo de la misma y que, se espera, sean de utilidad para participaciones futuras. Esta tesis también puede servir al lector para familiarizarse con las varillas de FRP y el hormigón de alta resistencia, viéndolos como materiales capaces de trabajar en conjunto para la conformación de estructuras.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to describe the process followed to design a beam-like structure that uses high strength concrete reinforced with FRP, and follows the conditions imposed by the “ACI FRP Composites Competition”. A bibliographic investigation about the nature and properties of FRP reinforcement and high strength concrete is presented. Also, presented as a guide, the process followed to obtain a concrete mixture capable of reaching a resistance of 110 MPa is showed in detail. Finally, the structural model used to design the structure, and new models that are capable of explaining the mode of failure are exposed. This thesis can also be used by the reader to get a general knowledge regarding FRP reinforcement and high strength concrete, viewing them as materials that can work together to create structures with special characteristics.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	17
Antecedentes.....	17
El problema.....	19
Hipótesis.....	20
Preguntas de investigación.....	21
Contexto y marco teórico.....	21
Propósito del estudio.....	22
Significado del estudio.....	23
Definición de términos.....	23
Presunciones del autor del estudio.....	24
Supuestos del estudio.....	24
Consideraciones finales.....	25
CAPÍTULO 2: REVISIÓN LITERARIA DE VARILLAS DE FRP.....	26
Introducción.....	26
Historia del uso de Varillas de FRP.....	27
Naturaleza de las varillas de refuerzo de FRP.....	28
Métodos de manufactura y producción de varillas FRP.....	31
Propiedades de las varillas FRP.....	35
Densidad.....	36
Anisotropía.....	36
Expansiones y retracciones por temperatura.....	37

Ductilidad.....	38
Comportamiento a tensión.....	39
Comportamiento a compresión.....	42
Adhesión al hormigón.....	42
Modos de Fallo.....	42
Desarrollo de fuerzas de adhesión.....	44
Consideraciones acerca de los métodos de ensayo.....	46
Resultados de investigaciones realizadas.....	47
Comportamiento a largo plazo.....	50
Durabilidad.....	51
Fatiga y fatiga estática.....	52
Consideraciones de diseño para hormigón reforzado con varillas de FRP.....	53
Diseño a flexión de hormigón armado con varillas de FRP.....	54
Consideraciones especiales de fisuramiento.....	58
Longitud de desarrollo y traslapes.....	59
CAPÍTULO 3: REVISIÓN LITERARIA DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.....	64
Introducción.....	64
Historia del uso y desarrollo del HSC.....	65
Naturaleza del HSC.....	66
Materiales y métodos utilizados para producción.....	68
Agregado grueso.....	69
Agregados Finos.....	70
Agua.....	70
Cemento Portland.....	72

Cementantes adicionales.....	73
Microsílice.....	74
Aditivos reductores de agua.....	79
Guías para la obtención de una mezcla volumétrica de HSC.....	79
Propiedades de HSC.....	80
Curvas de esfuerzo-deformación.....	81
Resistencia a la tensión.....	84
Resistencia al cortante.....	88
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE LA MEZCLA DE HSC.....	90
Introducción.....	90
Materiales seleccionados.....	92
Cemento.....	92
Microsílice.....	93
Aditivo reductor de agua de alto rango (HRWR).....	94
Agregados gruesos.....	94
Agregados finos.....	96
Agua.....	97
Requerimientos.....	97
Dosificación inicial.....	98
Preparación de muestras.....	99
Resultados.....	102
Discusión.....	104
CAPÍTULO 5: DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA.....	106
Introducción.....	106
Reglas y bases del concurso.....	106

Geometría.....	108
Preparación de especímenes.....	115
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y POSIBLES MEJORAS.....	117
Introducción.....	117
Resultados.....	117
Análisis tridimensional.....	119
Resultados para la estructura USFQ 1.....	121
Resultados para la estructura USFQ 2.....	124
Recomendaciones para diseños futuros.....	127
Limitaciones del análisis.....	128
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES.....	130
Respuestas a las preguntas de investigación.....	130
Limitaciones del estudio.....	132
Recomendaciones.....	133
BIBLIOGRAFÍA.....	135
ANEXOS.....	137
Anexo 1.....	137
Anexo 2.....	145
Anexo 3.....	152
Anexo 4.....	155

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Densidades típicas de varillas FRP (g/cm^3).....	36
Tabla 2: Coeficientes de expansión térmica para varillas FRP ($\times 10^6 / ^\circ C$).....	38
Tabla 3: Resistencia a la tensión y módulo de elasticidad para varillas FRP.....	40
Tabla 4: Resultados de ensayos de adherencia de Estefahani et al.....	48
Tabla 5: Factor de reducción por exposición ambiental.....	54
Tabla 6: Ejemplo de variaciones en la composición química de microsílíce.....	77
Tabla 7: Ejemplo de variaciones en las propiedades físicas de microsílíce.....	77
Tabla 8: Composición química del cemento CP-II, contenido de C3A limitado al 7.2%.....	93
Tabla 9: Composición química y propiedades de la microsílíce utilizada.....	94
Tabla 10: Pre-dosificaciones iniciales adoptadas.....	98
Tabla 11: Dosificaciones iniciales para producir 1 m ³ de hormigón.....	99
Tabla 12: Dosificaciones finales para producir 1 m ³ de hormigón.....	101
Tabla 13: Resistencia final a la compresión f'_c para ensayos a los 28 días.....	101
Tabla 14: Precios unitarios del mercado ecuatoriano.....	103
Tabla 15: Relación resistencia/costo para precios del mercado ecuatoriano....	103
Tabla 16: Relación resistencia/costo para precios del concurso ACI.....	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Varilla FRP cubierta con partículas inorgánicas.....	32
Figura 2. Ejemplos de acabados superficiales de varillas FRP.....	33
Figura 3. Varillas FRP con ondulaciones superficiales.....	34
Figura 4. Varillas FRP de sección no circular.....	35
Figura 5. Variación con el diámetro de la Resistencia Mínima Garantizada en varillas FRP.....	41
Figura 6. Variación con el diámetro de la Carga Última en varillas FRP.....	41
Figura 7. Desarrollo de fuerzas de adhesión para varillas de acero y FRP.....	44
Figura 8. Deslizamiento en el extremo de una varilla de refuerzo.....	45
Figura 9. Configuración clásica de un Ensayo de Adherencia Pull Out.....	46
Figura 10. Factor de reducción de la resistencia nominal a flexión.....	57
Figura 11. Resultados de ensayos tipo pull out.....	62
Figura 12. Resistencia f'_c para diversos valores de w/c.....	71
Figura 13. Variaciones en el valor de f'_c debidas a cambios en la marca de cemento.....	72
Figura 14. Curvas esfuerzo-deformación para HSC.....	81
Figura 15. Valores de módulo de elasticidad vs f'_c para varias mezclas de HSC.....	82
Figura 16. Valores f_r vs $\sqrt{f'_c}$ para varias mezclas de HSC.....	85
Figura 17. Valores f_{sp} vs $\sqrt{f'_c}$ para varias mezclas de HSC.....	87
Figura 18: Granulometría del agregado grueso AGR1 (3/4").....	95
Figura 19: Granulometría del agregado grueso AGR2 (3/8").....	95
Figura 20: Granulometría del agregado fino (arena gruesa) AFR1 (#4).....	96
Figura 21: Granulometría del agregado fino (arena fina) AFR2.....	96

Figura 22: Revenimiento típico en muestras de la mezcla 4.....	101
Figura 23: Superficie de fallo de cilindro de prueba a compresión (mezcla 4).	105
Figura 24: Configuración de soportes y carga para la estructura.....	107
Figura 25: Geometría previa para la estructura.....	109
Figura 26: Estructura representada como una cercha.....	109
Figura 27: Fuerzas actuantes en el Nodo A.....	110
Figura 28: Fuerzas actuantes en el Nodo B.....	110
Figura 29: Dimensiones finales para la estructura tipo cercha.....	112
Figura 30: Esquema de la geometría escogida para la estructura tipo viga (dimensiones en cm).....	114
Figura 31: Varilla “Marshall Industries C-Bar”.....	115
Figura 32: Varilla “Hughes Brothers Aslan”.....	115
Figura 33: Encofrado para estructuras finales.....	116
Figura 34: Imagen de estructuras finales.....	116
Figura 35: Superficie de la varilla “Marshall Industries C-Bar” posterior a la falla.....	118
Figura 36: Superficie de la varilla “Hughes Brothers Aslan” posterior a la falla.....	118
Figura 37: Falla a cortante.....	119
Figura 38: Modelo computacional de la estructura tipo viga.....	119
Figura 39: Propiedades de la varilla “Marshall Industries C-Bar”.....	120
Figura 40: Propiedades de la varilla “Hughes Brothers Aslan”.....	120
Figura 41: Propiedades del hormigón de alta resistencia.....	121
Figura 42: Esfuerzos en la varilla “Marshall Industries C-Bar” al momento de la falla.....	122

Figura 43: Esfuerzos en el cuerpo de hormigón de la estructura USFQ 1.....	123
Figura 44: Esfuerzos críticos en los brazos de la estructura USFQ 1 al momento de la falla.....	123
Figura 45: Esfuerzos en la varilla “Hughes Brothers Aslan” al momento de la falla.....	125
Figura 46: Esfuerzos en el cuerpo de hormigón de la estructura USFQ 2.....	125
Figura 47: Esfuerzos críticos en los brazos de la estructura USFQ 2 al momento de la falla.....	126

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

En esta tesis se investigan las propiedades y comportamiento de las varillas de FRP, así como las propiedades, el comportamiento y los métodos de producción del hormigón de alta resistencia. El propósito de dicha investigación es lograr producir una mezcla de hormigón capaz de superar los 90MPa de resistencia a la compresión f'_c y utilizarla en una estructura tipo viga, reforzada con FRP, que cumpla con las condiciones de diseño de la “ACI FRP COMPOSITES COMPETITION”.

El objetivo principal que se ha trazado es producir dos estructuras con la mayor relación resistencia–costo posible, y participar en la “ACI FRP COMPOSITES COMPETITION”. Para esto se combinarán los conocimientos acerca de las propiedades de los materiales, obtenidos en la revisión bibliográfica, con teorías de diseño estructural, con el fin de concebir una estructura que permita a los materiales trabajar de manera eficiente.

Finalmente se analizarán los resultados obtenidos en ensayos destructivos y se compararán con los resultados obtenidos por los modelos estructurales utilizados, con el fin de verificar su validez, o bien encontrar sus falencias y proponer modelos nuevos que puedan ser utilizados en participaciones futuras.

Antecedentes

El ACI es uno de los organismos más importantes a nivel mundial en temas que se refieren al estudio del hormigón y su uso junto con materiales de refuerzo, entre los que se encuentran las varillas de FRP. En su afán por familiarizar a las nuevas generaciones de ingenieros con los refuerzos hechos de FRP, e impulsar el uso y el avance en el

conocimiento de los mismos, ha nacido la iniciativa de llevar a cabo una competencia que invita a estudiantes universitarios de todas partes del mundo a desarrollar una estructura reforzada con FRP que logre la mayor relación resistencia-costo posible.

La competencia consiste en desarrollar una estructura de hormigón, reforzada con uno o más de los refuerzos de FRP que se entregan a los participantes. Las condiciones y detalles de la competencia se encuentran adjuntos como anexo (Anexo 1) a esta tesis y pueden ser revisadas por el lector.

A más de un adecuado diseño estructural, que tome en cuenta las propiedades de los materiales, la naturaleza misma de la competencia hace que el camino lógico a seguir sea desarrollar una mezcla de hormigón de alta resistencia. Se espera que un hormigón con mayor valor de f'_c permita usar de mejor manera la alta capacidad de las varillas de FRP entregadas, tema fundamental ya que su costo puede terminar siendo el mayor componente en el costo total de la estructura.

Con el afán de mostrar la calidad y expandir el conocimiento de sus estudiantes, la USFQ decidió participar en esta competencia que se llevó a cabo en el 2013. En esta tesis se expone el trabajo realizado para la creación de dos estructuras que participaron en la “ACI FRP COMPOSITES COMPETITION”, y se realiza una investigación más detallada de todos los temas que giran alrededor de la competencia con el fin de ampliar la información disponible y poder proponer métodos de diseño y análisis más completos que permitan crear estructuras más eficientes en participaciones futuras.

El problema

1. Las varillas de FRP entregadas a los participantes por el ACI (Anexo 2) tienen un funcionamiento diferente a las varillas de acero, el mismo que debe ser comprendido y estudiado para poder utilizarlas de manera efectiva en la estructura. Entre los temas importantes a tomar en cuenta se encuentran ductilidad, adherencia, su anisotropía, y su alta resistencia a la tensión (superior incluso las varillas de acero de alta resistencia). Estas varillas tienen, además, un costo mucho mayor al impuesto a los componentes del hormigón, por lo que se espera que representen el mayor porcentaje del costo total de la estructura (al menos superior al 50%).

De aquí que resulta indispensable lograr utilizar la alta capacidad de las varillas de la forma más eficiente posible. Se perseguirá este objetivo, principalmente, desarrollando una mezcla de hormigón de alta resistencia y mediante la concepción de una estructura en la cual el hormigón trabaje principalmente a compresión y el refuerzo absorba los esfuerzos de tensión.

2. Actualmente el Ecuador es un país donde se han explorado y aplicado de manera limitada las ventajas que pueden traer las nuevas tecnologías relacionadas con el hormigón. Entre estas se encuentran tanto los hormigones de alta resistencia, como las varillas de FRP y su uso como refuerzo para el hormigón. Pese a que ambos materiales han sido aplicados alrededor de todo el mundo en diversos proyectos, donde sus características especiales han reportado ventajas de todo tipo (económicas, funcionales, ambientales, etc), al momento de la realización de esta tesis no se encontró información acerca de proyectos de construcción que utilicen hormigón armado con FRP. Conseguir y desarrollar hormigones de alta resistencia

también presenta dificultades y limitaciones importantes en el mercado nacional, siendo común la práctica de importar el material desde el exterior.

Mediante la creación de una estructura para participar en la “ACI FRP COMPOSITES COMPETITION” esta tesis explora las propiedades de ambos materiales, así como su funcionamiento en conjunto. El lector también puede encontrar, explicado en detalle, el proceso seguido para la obtención de una mezcla de hormigón capaz de alcanzar los 109MPa de resistencia $f'c$ incorporando materiales disponibles en el mercado ecuatoriano.

Hipótesis

- a) Se cree que, por las condiciones impuestas por la competición, será imposible utilizar la capacidad a tensión última de las varillas de FRP entregadas. Es decir que, de utilizar el refuerzo trabajando a tensión, la falla no se producirá por la ruptura de este.
 - b) Utilizando hormigón de alta resistencia se espera, al menos, utilizar de manera más eficiente la alta capacidad del refuerzo.
-
- a) Se cree que el uso limitado de hormigón de alta resistencia y varillas de FRP en el Ecuador se debe a la falta de familiaridad que el profesional ecuatoriano tiene con estos materiales, y a la dificultad que representa el conseguirlos en el mercado local.

- b) Se cree que trabajos como este, que pongan a disposición del lector información útil acerca de los métodos de producción y usos de estos materiales, pueden contribuir a ampliar su uso en la industria nacional.

Preguntas de Investigación

¿Hasta qué punto es beneficioso para la estructura propuesta el uso de un hormigón de alta resistencia?

¿Hasta qué punto son útiles los diferentes modelos expuestos en esta tesis para el diseño de la estructura propuesta?

¿Hasta qué punto son aplicables las varillas de FRP y el hormigón de alta resistencia en proyectos nacionales?

¿Hasta qué punto es posible hablar de la manufacturación local de estos productos?

Contexto y marco teórico

El desarrollo de esta tesis utiliza dos enfoques principales, uno teórico y otro experimental, todo tratado desde la perspectiva de la ingeniería civil. El enfoque teórico consiste en el uso de métodos estáticos (análisis de cerchas), análisis de elementos finitos (utilizando el software comercial SAP2000), y los lineamientos y especificaciones de diseño en hormigón armado (resistencia al cortante, resistencia al arrancamiento, resistencia a la compresión, longitud de desarrollo, fuerzas de adherencia, etc) para realizar el diseño estructural. El enfoque experimental consiste en la realización de ensayos destructivos, toma de datos, y análisis de los modos de falla.

La idea final es corroborar la aplicabilidad de la teoría y modelos utilizados a la estructura real, de modo que sea posible desechar aquellos que produzcan predicciones no alineadas con los resultados experimentales, refinarlos de ser posible, o reemplazarlos por modelos que se ajusten a la realidad. Así se pretende, entregar al lector un conjunto de herramientas útiles que puedan ser aplicadas a futuras competencias en la “ACI FRP COMPOSITES COMPETITION”.

Propósito del estudio

Se espera poder proporcionar al lector de un conjunto de herramientas útiles a ser utilizadas en participaciones futuras en la “ACI FRP COMPOSITES COMPETITION”. Se espera poder realizar un modelo computacional capaz de predecir adecuadamente los esfuerzos presentes en la estructura y contar con herramientas de diseño que permitan diseñar la estructura para dichos estados de esfuerzo. En combinación se espera que estas herramientas sean útiles para optimizar la relación resistencia-costo de la estructura.

También se espera que la información aquí expuesta sea lo suficientemente extensa para familiarizar al lector con el comportamiento, propiedades, ventajas y desventajas de las varillas de FRP y del hormigón de alta resistencia. Esta tesis puede ser también utilizada como un guía práctica para la obtención de mezclas de hormigón de alta resistencia a partir de materiales que se pueden encontrar en el mercado ecuatoriano. Por último, se espera que la información aquí expuesta sirva al lector para vislumbrar posibles oportunidades y aplicaciones que el hormigón de alta resistencia y refuerzos de FRP puedan tener en proyectos locales.

Significado del estudio

En específico, el trabajo aquí expuesto es de utilidad para los grupos de estudiantes que participen en las ediciones futuras del “ACI FRP COMPOSITES COMPETITION”. Más allá de esto, la información que se encuentra en esta tesis puede ser valiosa para cualquier persona que desee familiarizarse con la naturaleza, propiedades, aplicaciones, e información de vanguardia referente a hormigones de alta resistencia y varillas de FRP como refuerzo para el hormigón. Más concretamente, la información aquí expuesta puede ser utilizada como una guía para desarrollar mezclas de hormigón de alta resistencia en el Ecuador, tema respecto del cuál no se encontró publicación o bibliografía alguna al momento de realizar esta tesis.

Definición de términos

- AFRP: “Aramid Fiber Reinforced Polymer”, traducido como polímeros reforzados con fibras de aramida. Las fibras de aramida son fibras sintéticas con enlaces moleculares fuertes orientados a lo largo del eje de la fibra.
- CFRP: “Carbon Fiber Reinforced Polymer”, traducido como polímeros reforzados con fibras de carbono.
- FRP: “Fiber Reinforced Polymer”, traducido como polímeros reforzados con fibras. Son materiales compuestos que se forman de fibras altamente resistentes a la compresión que trabajan juntas gracias a la acción de una resina que forma la matriz de los mismos.
- GFRP: “Glass Fiber Reinforced Polymer”, traducido como polímeros reforzados con fibras de vidrio.
- Hormigón de alta resistencia: hormigón de resistencia f'_c igual superior a los 55 MPa.

- Microsílice: puzolánico producto de desecho de la industria de metales silicoferrosos.

Presunciones del autor del estudio

Se presume que el obtener una mejor relación resistencia-costo para la estructura girará alrededor de lograr utilizar el refuerzo de FRP de la manera más eficientemente posible. Se presume también que para lograr aquel objetivo será necesario el uso de una mezcla de hormigón de alta resistencia. Además, se cree que mientras mayor sea la resistencia del hormigón mayor será la relación resistencia-costo de la estructura, por lo cual no se ha puesto un límite a la resistencia que se desea alcanzar y más bien se ha apuntado a obtener la mayor resistencia posible. Por último, se presume que se puede desarrollar una mezcla de hormigón, capaz de superar los 90MPa, utilizando materiales disponibles en el mercado ecuatoriano, de preferencia de producción nacional.

Supuestos del estudio

En esta tesis se ha supuesto que los datos obtenidos en los ensayos son veraces, previo a una calibración minuciosa de los equipos de medición. Se ha supuesto también una variabilidad mínima en la calidad del hormigón, suponiéndose que la resistencia del hormigón presente en la estructura es la misma que la del hormigón presente en los cilindros utilizados para los ensayos de las pruebas de compresión última. Por último se ha supuesto que toda la información presentada por los productores de las varillas de refuerzo entregadas a los participantes es precisa y no se han realizado pruebas para comprobar su veracidad.

Consideraciones finales

Para cumplir con los objetivos trazados en esta tesis se iniciará por realizar una revisión literaria lo suficientemente extensa, que permita una familiarización adecuada con las propiedades de las varillas de FRP y el hormigón de alta resistencia. Con un conocimiento adecuado sobre estos materiales, se espera que puedan trabajar en conjunto para conformar una estructura que los utilice a ambos de una manera eficiente.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN LITERARIA DE VARILLAS DE FRP

Introducción

Las varillas de polímeros reforzados con fibras (en adelante varillas FRP) son un sustituto del acero en la conformación de hormigón armado. Pese a llevar ya varios años en el mercado internacional, siguen mostrando evoluciones constantes debido a la aparición de nuevas tecnologías, materiales, y métodos de fabricación. Por este motivo el uso de este tipo de varillas como refuerzo para hormigón puede beneficiarse aún de una mayor cantidad de investigación, con el fin de obtener diseños más seguros, confiables, y económicos (ACI 440, 2006).

Las siglas FRP vienen del nombre utilizado para designar a este tipo de materiales en el idioma inglés, “fiber reinforced polymer”, que se traduce al español como polímeros reforzados con fibras. Ya que la mayor cantidad de información y publicaciones realizadas respecto a estos materiales se han publicado en el idioma inglés, se mantendrá el uso de las siglas FRP para designarlos. Con el fin de tener una comprensión adecuada acerca de sus propiedades, usos, ventajas, desventajas, y lineamientos de diseño para su uso como refuerzo para hormigón armado se ha tomado como base el código del ACI 440.1R-06 que es presentado como una guía para el diseño de hormigón estructural reforzado con varillas FRP. Se han estudiado además varias investigaciones y publicaciones más recientes con el fin de ampliar el contenido del código ACI 440.1R-06.

Con estos puntos en mente se procede a hablar de la historia y evolución de los polímeros reforzados con fibras y su aplicación como refuerzo para hormigón,

posteriormente se tratarán sus propiedades y lineamientos básicos de diseño. Frecuentemente se las comparará con el acero estructural por ser el material más utilizado para reforzar estructuras de hormigón en la actualidad y tener un comportamiento ampliamente conocido.

Historia del uso de Varillas de FRP

Las varillas de FRP son en esencia materiales compuestos (materiales que se componen de la combinación de dos o más sub-materiales que actúan juntos pero retienen su identidad), siendo sus componentes principales fibras con alta resistencia a la tensión y una matriz que les permite trabajar juntas. El desarrollo y uso de compuestos fue pensado en un inicio para la industria aeroespacial, donde el uso de materiales livianos y de alta resistencia proporciona importantes ventajas (ACI 440, 2006). Es así que durante la segunda guerra mundial y la guerra fría hubo un avance importante, y en 1960 estos materiales empezaron a considerarse seriamente como posibles refuerzos para hormigón. Las principales razones para impulsar el estudio y uso de compuestos FRP como sustitutos del acero fueron las ventajas que estos nuevos materiales reportaban por su naturaleza distinta. A diferencia del acero, las varillas de FRP no sufren de corrosión y se componen de materiales no magnéticos que no conducen la electricidad (ACI 440, 2006).

En los Estados Unidos, por ejemplo, la importante y continua expansión del sistema de carreteras que se dio en la década de 1950, llevó a importantes gastos y esfuerzos de mantenimiento que debían realizarse de manera continua a lo largo de todo el año (ACI 440, 2006). El uso de acero de refuerzo en carreteras y puentes hechos de hormigón empezó a mostrar problemas serios de corrosión por el uso de sales para evitar el congelamiento de la superficie. Como respuesta al problema se realizaron varias

investigaciones en búsqueda de una solución, estando la mayoría orientadas a proteger el acero de refuerzo, como por ejemplo empleando un recubrimiento epóxico. Poco interés se dio en inicio al uso de varillas de FRP hasta que se detectaron problemas de corrosión en estructuras que utilizaron los métodos más populares de protección anticorrosiva. En 1983 el USDOT dio fondos para el primer proyecto encaminado a utilizar varillas de refuerzo FRP en estructuras, denominado “Transfer of Composite Technology to Design and Construction of bridges” (ACI 440, 2006).

En Japón el avance fue mucho más rápido y para 1990 se tenían ya 100 proyectos que implementaban FRP. En 1986 Alemania construye el primer puente con refuerzo FRP en Europa con el uso de varillas de FRP pretensadas. Actualmente, China es el mayor consumidor de refuerzo de FRP para hormigón y su uso se ha vuelto más común alrededor del mundo (ACI 440, 2006). En el 2013 se estimó una producción anual de más de 10 millones de metros lineales de refuerzo FRP (El-Nemr, Ahmed y Benmokrane, 2013).

A más de prevenir problemas de corrosión, el uso de refuerzo de FRP se ha vuelto una práctica común en varios países para la construcción de salas de operación de máquinas de IRM (imagen por resonancia magnética), laboratorios electrónicos, y cualquier otra estructura donde las propiedades magnéticas del acero representen un problema (ACI 440, 2006).

Naturaleza de las varillas de refuerzo de FRP

Esencialmente, las varillas de FRP se constituyen de fibras de un material con alta resistencia a la tensión unidas por una resina que funciona como matriz de la varilla, transmitiendo los esfuerzos entre las fibras y permitiéndoles trabajar juntas (ACI 440,

2006). Como se puede notar, la definición es muy general y termina por abarcar un gran número de varillas con ciertas similitudes, pero con variaciones importantes en muchas de sus propiedades. Las propiedades finales de la varilla dependen de varios factores, siendo los principales el tipo de fibras utilizadas (pudiendo una varilla contener más de un solo tipo de fibra), el tipo de resina, y el volumen total de la varilla que representan las fibras. Existen otros varios factores que afectan las propiedades finales, estos pueden ser el diámetro de la varilla, el método de manufactura utilizado y el mecanismo o mecanismos utilizados para dar a la varilla una adherencia adecuada con el hormigón.

Las resinas utilizadas pueden clasificarse en termoestables y termoplásticas. En un inicio la resina debe estar en una forma líquida, que sea maleable de modo que permita bañar las fibras y darle forma a la varilla. La diferencia entre estos tipos de resina radica en que las resinas termoestables luego de ser curadas se solidifican y los cambios que se producen en su constitución no le permiten volver a su estado maleable (ACI 440, 2006). Las resinas termoplásticas pueden volver a ganar, al menos parcialmente, parte de su manejabilidad, típicamente al exponerlas a temperaturas elevadas (ACI 440, 2006). Esta diferencia es importante ya que, dado la falta de ductilidad de las varillas de FRP, estas no tienen la capacidad de fluir. Así, para varillas fabricadas con resinas termoestables, la forma final de la varilla debe ser dada desde su fabricación. En el caso de una resina termoplástica, se podría exponer la varilla a temperaturas elevadas para facilitar su deformación, sin embargo estos procesos son delicados ya que pueden afectar las propiedades de la varilla. En todo caso el ingeniero de diseño debe estar en conocimiento de este fenómeno para verificar que, incluso en condiciones extremas como un incendio, no se vayan a alcanzar temperaturas que activen la termoplasticidad de la varilla dejándola sin capacidad de resistir esfuerzos.

Sobre los tipos de fibras, el código ACI 440.1R-06 empieza por agruparlas en tres tipos principales que son aramidas, fibras de carbono, y fibras de vidrio (ACI 440, 2006).

Clasifica así las varillas de FRP en tres grupos principales:

- AFRP: “Aramid Fiber Reinforced Polymer”, traducido como polímeros reforzados con fibras de aramida. Las fibras de aramida son fibras sintéticas con enlaces moleculares fuertes orientados a lo largo del eje de la fibra.
- CFRP: “Carbon Fiber Reinforced Polymer”, traducido como polímeros reforzados con fibras de carbono.
- GFRP: “Glass Fiber Reinforced Polymer”, traducido como polímeros reforzados con fibras de vidrio.

Como se observará más tarde, al presentar las propiedades y consideraciones de diseño para varillas de FRP, el código debe diferenciar entre un tipo y otro pues pueden variar de manera considerable. Incluso entre las varillas de un mismo tipo pueden existir variaciones importantes, por lo que el código presenta rangos de valores para muchas de sus propiedades. Algunas de las investigaciones y publicaciones consultadas encuentran también resultados distintos para tipos diferentes de varillas, o varillas del mismo tipo que utilizan mecanismos diferentes de adherencia y de manufactura. Por todo esto lo más recomendable es trabajar con varillas FRP que provengan de un productor de confianza y capaz de entregar toda la información pertinente para garantizar un diseño adecuado.

Métodos de manufactura y producción de varillas FRP

Como ya se mencionó anteriormente, diferentes métodos de manufactura producen varillas FRP con propiedades distintas. El trabajo de Portnov, Bakis, Lackey y Kulakov (2013) presenta una síntesis y explicación de algunos de estos tipos de manufactura. Empieza por indicar los motivos por los cuáles se han desarrollados métodos tan diversos de manufactura, siendo los principales la protección por patentes (que impide a la competencia adoptar un método preexistente) y los avances tecnológicos (que permiten nuevas formas de producción más efectivas y la obtención de varillas con mejores propiedades). En todo caso, el mundo de producción de varillas de FRP se encuentra aún en constante evolución, muy distinta a la industria productora de acero de refuerzo que es mucho más estática y estandarizada.

Portnov et al. (2013) distingue tres grupos principales de varillas, clasificándolas por la geometría de las secciones transversales que se obtienen y el acabado de su superficie:

- Varillas cuya sección transversal es circular y tienen una superficie trabajada de alguna forma para mejorar su adhesión o fricción con el hormigón.
- Varillas de sección transversal circular cuya superficie tiene ondulaciones (corrugada), comparables a las que se encuentran en las varillas de refuerzo de acero, con el fin de aumentar la adherencia mecánica.
- Varillas con secciones transversales no circulares, con deformaciones que pueden ir variando a lo largo de la varilla aumentando la adhesión mecánica.

Para los tres grupos, la mayoría de los métodos de producción presentados utilizan como base a la pultrusión. La pultrusión es un proceso que consiste en bañar las fibras de

refuerzo en resina, para luego someterlas a un proceso de moldeo y curado, donde se endurece la resina formándose la varilla (ACI 440, 2006). En su forma más simple, la varilla obtenida por pultrusión tiene una superficie demasiado lisa como para desarrollar adherencia suficiente con el hormigón, motivo por el cual han aparecido métodos para mejorar su adherencia (Portnov et al., 2013).

Se empezará por analizar el primer grupo de varillas mencionado, son varillas de sección transversal circular y cuya superficie ha sido trabajada de modo que sea capaz de desarrollar fuerzas de adherencia adecuadas. El proceso más común consiste en utilizar partículas inorgánicas que puedan adherirse a la superficie de la varilla, dándole rugosidad y aumentando principalmente las fuerzas de fricción. Este recubrimiento puede desarrollar también adherencia química con el hormigón (Portnov et al., 2013).

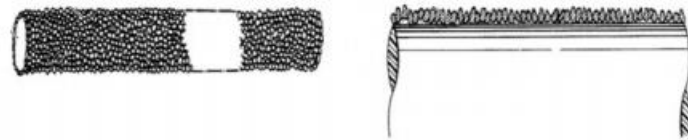


Figura 1. Varilla FRP cubierta con partículas inorgánicas

Fuente: Portnov, G., Bakis, C. E. & Kulakov, V. (2013). FRP reinforcing bars – Design and methods of manufacture. *Mechanics of Composite Materials*, 49(4), 381-398. doi: 0191-5665/13/4904-0381

Un segundo método consiste en utilizar algún tipo de fibra o material adicional para envolver la superficie de la varilla generando anillos como se puede apreciar en la Figura 2. Este tipo de métodos mejoran la adhesión mecánica de la varilla al darle una superficie irregular que pueda generar trabas con el hormigón circundante.

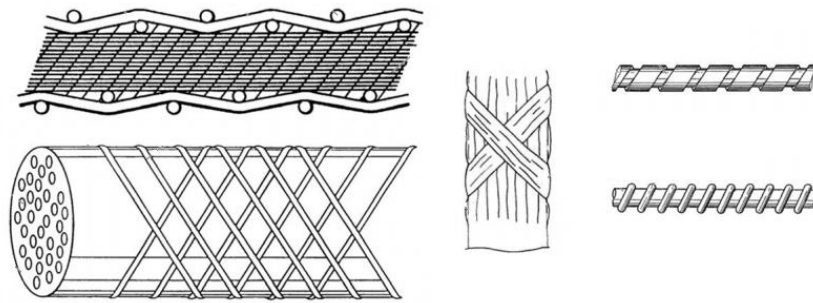


Figura 2. Ejemplos de acabados superficiales de varillas FRP

Fuente: Portnov, G., Bakis, C. E. & Kulakov, V. (2013). FRP reinforcing bars – Design and methods of manufacture. *Mechanics of Composite Materials*, 49(4), 381-398. doi: 0191-5665/13/4904-0381

Pese a la probada efectividad y eficiencia de los métodos de manufacturación antes descritos, éstos tienen como desventaja el hecho de que los elementos utilizados para modificar la superficie de la varilla son incorporaciones adicionales que pueden ocasionar un fallo prematuro. Al entrar en funcionamiento, el refuerzo desarrolla esfuerzos de corte entre las adiciones superficiales y el resto de la varilla, lo que puede provocar un desprendimiento de las mismas (Portnov et al., 2013). Además, se reconoce que estos elementos incorporados pueden terminar por aumentar la sección transversal de la varilla y no aportan a la resistencia final de la misma, con lo cual se reduce su capacidad por unidad de área.

Para el segundo tipo de varillas, se tienen métodos que principalmente consisten en incluir alguna modificación o paso adicional al proceso común de pultrusión con el fin de obtener ondulaciones superficiales. Se puede, por ejemplo, enrollar la varilla con algún tipo de cinta especial antes de su curación final dándole la textura deseada (Figura 3).

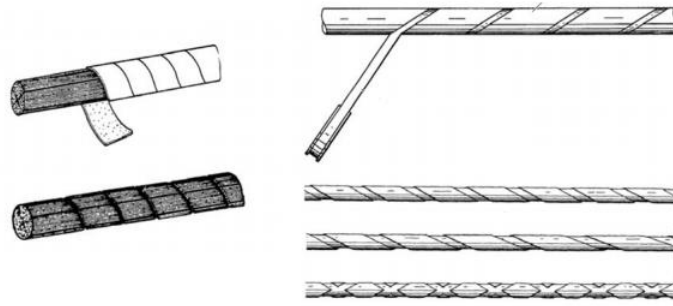


Figura 3. Varillas FRP con ondulaciones superficiales

Fuente: Portnov, G., Bakis, C. E. & Kulakov, V. (2013). FRP reinforcing bars – Design and methods of manufacture. *Mechanics of Composite Materials*, 49(4), 381-398. doi: 0191-5665/13/4904-0381

Esta superficie irregular de la varilla es capaz de darle una buena adhesión mecánica al hormigón, pero no se espera que estos procesos mejoren su capacidad por unidad de área. De hecho el proceso de moldeado puede producir desalineaciones de las fibras y concentraciones de esfuerzos que pueden llevar a problemas de desempeño (Portnov et al., 2013). Además, pese a ser deformaciones superficiales y no adiciones, en las proyecciones que se forman en la varilla se desarrollarán también esfuerzos de corte pudiendo producirse un tipo de falla similar a la descrita para el grupo uno.

El tercer grupo de varillas se obtienen con métodos que producen una sección transversal no circular. La idea detrás de esto es aumentar el radio entre el perímetro de la sección transversal de la varilla y el área de la misma (Portnov et al., 2013). Esto termina por producir varillas con mayor superficie de contacto por unidad de longitud, al compararlas con una varilla circular típica. Como las fuerzas de adherencia se desarrollan a lo largo de la superficie de contacto entre el hormigón y la superficie de la varilla se espera que esta innovación lleve a menores longitudes de desarrollo, y a disminuir el tamaño de las fisuras en el hormigón (Portnov et al., 2013). Ejemplos de secciones transversales con estas características se muestran en la Figura 4. La sección transversal “a” por ejemplo tienen una relación perímetro-área superior al doble de la relación obtenida en una sección

circular (Portnov et al, 2013). Se puede así llegar a utilizar los materiales que conforman la varilla de manera más eficiente pues, para la misma cantidad de materiales, este tipo de geometrías ayuda a que las fibras desarrollen su capacidad de mejor manera disminuyendo la probabilidad de que la falla se dé por adherencia.

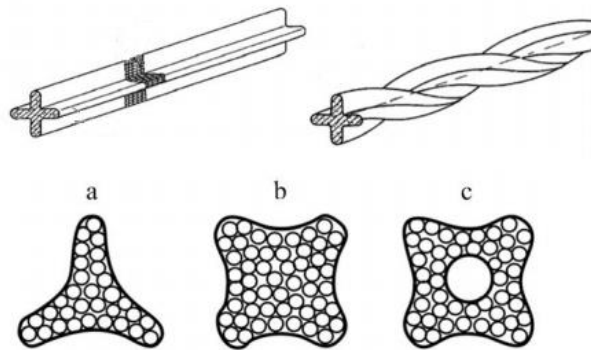


Figura 4. Varillas FRP de sección no circular

Fuente: Portnov, G., Bakis, C. E. & Kulakov, V. (2013). FRP reinforcing bars – Design and methods of manufacture. *Mechanics of Composite Materials*, 49(4), 381-398. doi: 0191-5665/13/4904-0381

Se debe notar que los métodos de producción de estas secciones especiales suelen llevar a costos más elevados y que, de darse el caso, el colocar las fibras en una orientación que no sea puramente longitudinal puede afectar la resistencia a la tensión de las varilla e incluso provocar modos de fallo distintos por los esfuerzos que se desarrollan entre las capas de la varilla (Portnov et al., 2013).

Propiedades de las varillas FRP

Como se comentó anteriormente, el gran número de materiales y variaciones que existen entre el grupo de varillas denominadas como FRP hace que existan varias clases y productos finales con propiedades potencialmente distintas. Sin embargo varias generalizaciones importantes pueden ser hechas de modo que se entienda más claramente el comportamiento de este tipo de refuerzo. Al exponer las propiedades de las varillas de

FRP es muy común compararla con las del acero pues es un refuerzo mucho más conocido y estudiado.

Densidad

Las varillas FRP son mucho más livianas que las de acero, siendo esta propiedad una de las más exhibidas por los productores ya que lleva a una disminución en la carga muerta de la estructura, puede producir ahorros en transporte, y facilitar su traslado y colocación (ACI 440, 2006). En la Tabla 1 se pueden apreciar densidades promedio de varillas FRP y compararla con las de acero, viendo que las primeras pueden ser hasta cinco veces más livianas.

Tabla 1:
Densidades típicas de varillas FRP (g/cm^3)

Acero	GFRP	CFRP	AFRP
7.9	1.25-2.10	1.50-1.60	1.25-1.40

Nota. Fuente: ACI 440 (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-06). EE.UU.: American Concrete Institute.

Anisotropía

Una primordial característica es que, a diferencia del acero, las varillas FRP son anisotrópicas (ACI 440, 2006). Esto quiere decir que sus propiedades varían dependiendo de la dirección en que se midan. Esto se debe a que son compuestos donde las fibras de refuerzo se encuentran orientadas a lo largo del eje longitudinal, y son las que producen el principal aporte a la resistencia de la misma. Así, por ejemplo, su resistencia a fuerzas de corte y esfuerzos que no se desarrollen axialmente es mucho menor a su resistencia a la tensión ya que las fibras no trabajan adecuadamente (ACI 440, 2006). Este fenómeno llega incluso a hacer que su manipulación y colocación sea delicada y requiera de ciertas consideraciones con el fin de no provocar daños en su estructura que afecten su funcionamiento al encontrarse embebidas en el hormigón.

Esta anisotropía también hace que ciertos ensayos, como de resistencia a la tensión y de arrancamiento, deban ser realizados con cuidado y con consideraciones especiales. Esfuerzos excesivos en los puntos de anclaje de la varilla, como las mordazas de una máquina de ensayos de tensión, pueden llevar a fallas prematuras de la varilla (ACI 440, 2006). Esto ha llevado al Comité 440 del ACI a desarrollar toda una guía de procedimientos adecuados para realizar ensayos con compuestos FRP, la última versión de este documento actualmente es el ACI 440.3R-04.

Expansiones y retracciones por temperatura

Típicos valores para los coeficientes de expansión por temperatura (CTE) pueden verse en la Tabla 2 para varillas con un 50 a 70% de fibras por unidad de volumen. Como se puede apreciar, los valores reflejan la anisotropía de las varillas, con coeficientes muy distintos en la dirección longitudinal y transversal, pudiendo ser los segundos de un orden de magnitud mayor a los primeros. Incluso se ve que varillas FRP a base de fibras de carbono y aramidas pueden tener coeficientes longitudinales negativos y transversales positivos.

El Comité ACI 440 (2006) indica como referencia los coeficientes de expansión térmica del hormigón que van de 7.2×10^6 a $10.8 \times 10^6 / ^\circ\text{F}$. Como se puede apreciar, los valores del CTE del hormigón y del acero son razonablemente similares pero con las varillas FRP, en especial de fibras de carbón y aramidas, pueden existir variaciones muy importantes. Para este trabajo no se ha investigado qué efectos puede tener este fenómeno en el desempeño de una estructura, pero se piensa que expansiones y retracciones cíclicas pueden generar esfuerzos que lleven al desgaste de la adhesión entre la varilla y el hormigón, o incluso fallas por fatiga.

Tabla 2:
Coeficientes de expansión térmica para varillas FRP ($\times 10^6 / ^\circ\text{C}$)

Dirección	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal	11.7	6.0-10.0	(-9.0)-(-0.0)	(-6.0)-(-2.0)
Transversal	11.7	21.0-23.0	74.0-104.0	60.0-80.0

Nota. Fuente: ACI 440 (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-06). EE.UU.: American Concrete Institute.

Ductilidad

Otra característica es su falta de ductilidad. Las varillas FRP tienen una falla frágil pues no cuentan con zona de fluencia como el acero, su deformación es prácticamente lineal hasta que se produce la fractura (ACI 440, 2006). Esta propiedad llega a afectar incluso la filosofía de diseño utilizada. Una falla dúctil es preferible a una frágil por razones de seguridad, dando las fallas dúctiles amplio aviso de una inminente falla o daño estructural, y las frágiles siendo abruptas. Es por eso que en vigas de hormigón reforzado con acero se hace un diseño tal que la falla empieza por fluencia del acero y se evita una falla por sobreesfuerzos en la zona de compresión del hormigón. En el caso de las varillas de FRP, tanto la falla por compresión en el hormigón, como las fallas por adherencia y por ruptura del refuerzo a tensión son frágiles. Por este motivo se permite colocar un porcentaje de refuerzo mayor al balanceado, que es el porcentaje de refuerzo que según la teoría debería producir una falla simultánea de la capa a compresión de hormigón y el refuerzo a tensión (ACI 440, 2006).

La incapacidad de fluir de las varillas y su falla de tipo frágil también hace imposible el manipularlas en obra para la formación de ganchos, estribos, etc. Para varillas con dobleces, y formas distintas al de una varilla recta, se debe trabajar con el productor de manera cercana pues, por las propiedades anisotrópicas de las varillas, la resistencia en las zonas de dobleces varía considerablemente dependiendo de varios factores como el tipo de

resina utilizado y la técnica utilizada para doblarla (ACI 440, 2006). La reducción de la resistencia puede estar entre un 40 y 50% (ACI 440, 2006).

Comportamiento a tensión

Como se mencionó, la falta de ductilidad de la varilla hace que al ser cargada de manera progresiva llegue a la falla sin pasar por una etapa de fluencia. Las varillas FRP tienen una relación esfuerzo-deformación lineal hasta que se produce la falla (ACI 440, 2006). Tanto el módulo de elasticidad como resistencia a la tensión son muy dependientes del porcentaje de fibras por unidad de volumen de la varilla (ACI 440, 2006). Los valores típicos de estas propiedades para porcentajes de fibras del 50 al 70% se muestran en la Tabla 3. Como se puede ver en la Tabla 3, los módulos de elasticidad de varillas con fibras de vidrio y aramidas pueden ser mucho menores a los del acero. Acorde a Portnov et al. (2013) este es uno de los problemas por los cuáles el uso de varillas de FRP es limitado a condiciones en las cuáles el acero presenta problemas de desempeño. El motivo es que un módulo de elasticidad bajo se traduce en deformaciones mayores para esfuerzos iguales. Por esto, aunque una viga armada con FRP no experimente fluencia del refuerzo, esta podría desarrollar fisuras de tamaño excesivo bajo cargas de diseño (Portnov et al., 2013). El control del fisuramiento del hormigón en el área de tensión puede incluso llegar a ser el factor limitante del diseño, llevando a utilizar una cantidad de refuerzo significativamente mayor a la que se necesitaría únicamente por consideraciones de resistencia (Portnov, 2013).

Tabla 3:
Resistencia a la tensión y módulo de elasticidad para varillas FRP

	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Resistencia a la Tensión (MPa)	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Módulo de Elasticidad (Gpa)	200	35-51	120-580	41-125

Nota. Fuente: ACI 440 (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-06). EE.UU.: American Concrete Institute.

En la Tabla 3 podemos ver también una de las ventajas más importantes de las varillas de FRP, que es su alta resistencia a la tensión, pudiendo ser cinco veces mayor a la del acero. Sin embargo por diversos problemas, como un bajo módulo de elasticidad o la adherencia entre la varilla y el hormigón, actualmente es complicado que se logre utilizar la totalidad de la capacidad de las varillas (Portnov, 2013). Una de las soluciones que discuten Portnov et al. (2013) es pretensar las varillas pero, por su anisotropía, el proceso debe ser realizado con cuidado ya que utilizar cuñas o, en general, producir esfuerzos de compresión excesivos en la dirección transversal a la varilla puede dañarla.

Otro factor a tomar en cuenta por el diseñador es que la resistencia de la varilla por unidad de área no es constante para todos los diámetros, y tiende a disminuir para diámetros mayores (ACI 440, 2006). En los catálogos de varillas FRP que se presentan en esta tesis como anexo (Anexo 2) se puede apreciar este fenómeno y cómo varía de un productor a otro. Para las varillas Aslan 100 y 200, por ejemplo, se da una caída considerable de la resistencia a la tensión con el aumento de diámetro de la misma. Para las varillas V-Rod Standard se ve que la resistencia aumenta de los tamaños #2 a #4 y luego comienza a descender. Las TUF-BAR presentan un caso más curioso donde, pese a existir la tendencia a la caída de la resistencia con el aumento de diámetro, se registran aumentos y decrementos aleatorios como se puede ver en la Figura 5. Sin embargo, como se puede

ver en la Figura 6, varillas de diámetro mayor también tienen una mayor área de sección transversal con lo cual la carga última que puede soportar la varilla termina incrementándose.

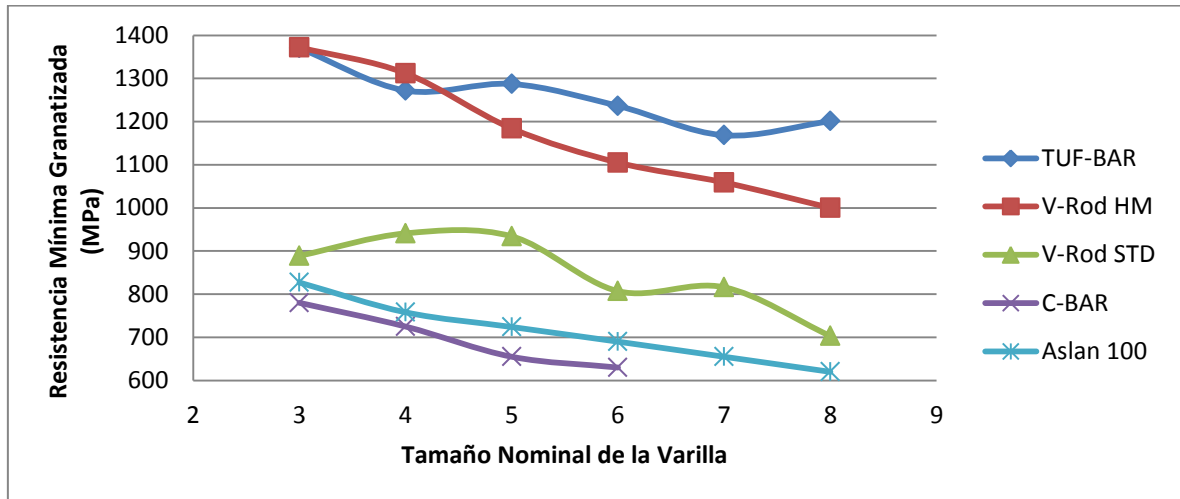


Figura 5. Variación con el diámetro de la Resistencia Mínima Garantizada en varillas FRP

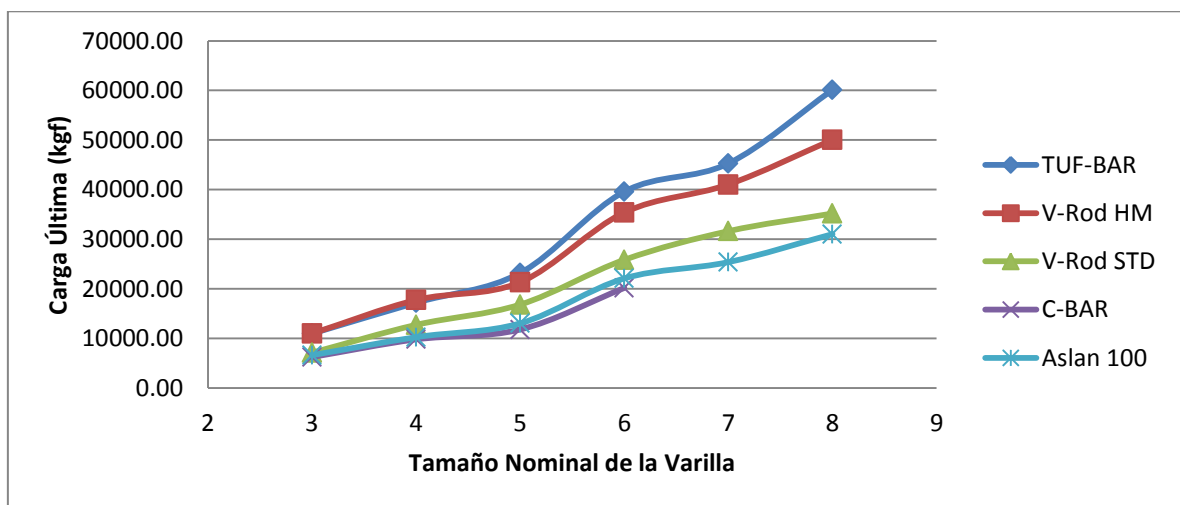


Figura 6. Variación con el diámetro de la Carga Última en varillas FRP

En los mismos catálogos se puede ver que diferentes varillas pueden presentar o no variaciones en otras propiedades como el módulo de elasticidad, deformaciones finales y fuerza de adhesión con el cambio de diámetro. Es una característica de las varillas FRP que

el diseñador debe tomar en cuenta para evitar realizar estimaciones equivocadas de sus propiedades.

Comportamiento a compresión

Actualmente el código ACI 440.1R-06 no recomienda utilizar varillas FRP como refuerzo a compresión (ACI 440, 2006). Por la naturaleza de las varillas FRP sus propiedades a tensión no son las mismas que a compresión y se registran reducciones en su resistencia de hasta el 70% y fallas que indican un mal comportamiento de la varilla como pandeo y desprendimiento de las fibras de refuerzo (ACI 440, 2006).

Adhesión al hormigón

Esta es una de las propiedades de las varillas FRP que más se ha revisado para esta tesis pues, por la configuración de la estructura que se pretende realizar, se espera una tendencia a la falla por desprendimiento. Además es uno de los temas más estudiados y discutidos en lo que se refiere a varillas de FRP por ser un factor determinante en el funcionamiento conjunto de las varillas con el hormigón. En esta parte de la tesis se pretende dar al lector una visión panorámica de cómo operan las fuerzas de adhesión entre el hormigón y las varillas FRP. Para esto se discutirán los posibles modos de fallo que pueden ocurrir, los mecanismos por los cuáles se desarrollan las fuerzas de adhesión, las limitaciones de los métodos de ensayo y una síntesis y discusión de resultados de varias investigaciones realizadas.

Modos de Fallo

En su tesis doctoral Baena (2010) presenta los cuatro posibles modos de fallo que se pueden dar en la interface entre el hormigón y su refuerzo:

- Desprendimiento parcial o total de la superficie de la varilla: como se ha visto, las varillas FRP pueden contar con adiciones superficiales para mejorar su adherencia o deformaciones superficiales. Incluso en el caso de una varilla lisa se desarrollan fuerzas de corte entre la superficie de la varilla y el resto de la misma. Soportar y transmitir estos esfuerzos al resto de la varilla es uno de los papeles principales que juega la resina, al llegar al límite de su capacidad la resina falla y se produce el desprendimiento parcial o total de la superficie de la varilla (Baena, 2010).
- Falla del hormigón: en la interfaz entre el hormigón y la varilla se desarrollan esfuerzos que pueden exceder a la resistencia del hormigón. Investigaciones muestran que el hormigón situado entre las deformaciones de una varilla trabaja principalmente a corte cuando la varilla intenta deslizarse, en este caso la resistencia a corte del hormigón sería el parámetro principal que impide el fallo de su interfaz con la varilla (Baena, 2010).
- Deslizamiento (squeeze through): por sus propiedades anisotrópicas la rigidez de la varilla puede ser mucho menor en su dirección radial. Esto ayuda a que la varilla simplemente se deforme comprimiéndose, llegando a deslizarse por el hormigón. La principal fuente de adhesión en este caso sería la fricción (Baena, 2010).
- Falla combinada: una falla que se dé por combinación de dos o más de las fallas anteriores.

De aquí se deduce que el hecho de que se produzca un tipo de falla u otro puede depender en gran medida del tipo de hormigón que se esté utilizando. Dejando de lado la falla por deslizamiento, el que se produzca una falla por desprendimiento superficial o por falla del hormigón es muy similar a discutir si la resina o el hormigón serán el factor limitante de la máxima fuerza de adhesión que se pueda alcanzar. Un hormigón demasiado

débil será aplastado por las deformaciones de la varilla y esta saldrá intacta. Un hormigón de resistencia mayor obligará al fallo de la resina, pudiendo quedar los anillos o deformaciones de la varilla embebidos en el hormigón. Resistencias intermedias del hormigón llevarán a fallas combinadas.

Desarrollo de fuerzas de adhesión

Baena (2010) presenta tres mecanismos por los cuáles se desarrollan las fuerzas de adherencia entre el hormigón y el refuerzo de FRP, que son las mismas a las desarrolladas entre el hormigón y refuerzo de acero. Estos mecanismos son adhesión química, fricción y aplastamiento del hormigón por las corrugaciones o deformaciones superficiales de la varilla. De estas tres el aplastamiento del hormigón es la principal pues varillas lisas, tanto de acero como FRP, que desarrollan sólo adhesión química y fricción tienen una fuerza de adhesión última mucho menor a la que presentan varillas con capacidad de acúñamiento (Baena, 2010). Presenta también un diagrama que explica cómo se van desarrollando las fuerzas de adhesión en una varilla de FRP a medida que aumentan los esfuerzos en la interface hormigón-refuerzo:

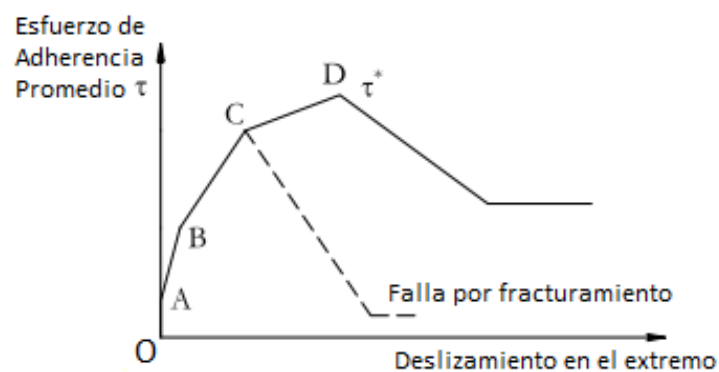


Figura 7. Desarrollo de fuerzas de adhesión para varillas de acero y FRP

Fuente: Baena Muñoz, M. (2010). Study of bond behaviour between FRP reinforcement and concrete. (Tesis inédita de doctorado). Universitat de Girona, España.

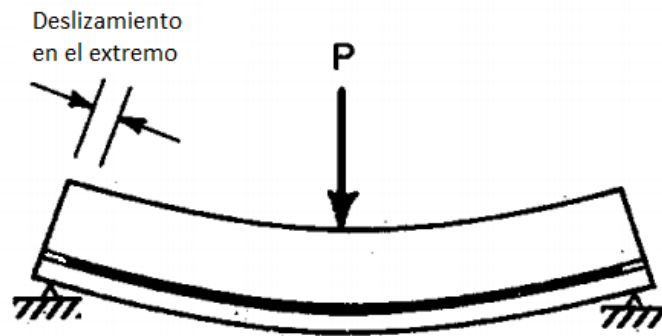


Figura 8. Deslizamiento en el extremo de una varilla de refuerzo
Fuente: Nilson, A. (1999). Diseño de estructuras de concreto. Bogotá: Mc GrawHill.

Cómo se puede ver en la Figura 7, antes de que el esfuerzo promedio de adherencia crezca hasta llegar al punto A existe una compatibilidad de deformaciones entre la varilla y el hormigón circundante pues no existe deslizamiento de los extremos. Según Baena (2010), esto es cierto mientras la adhesión química sea la principal fuente de adherencia en funcionamiento. A medida que se pasa a la región “AB” aparecen fisuras en el hormigón circundante, lo que debilita la adherencia química y empiezan a trabajar las deformaciones de la varilla. En esta zona el aplastamiento del hormigón es la principal fuente de adhesión. Entrando a la sección “BC” el deslizamiento de la varilla empieza a aumentar con mayor velocidad y las grietas formadas en la interfaz refuerzo-hormigón se ensanchan y propagan hacia la superficie del hormigón. Tanto Baena (2010) como Nilson (1999) concuerdan en que de no existir un confinamiento apropiado la propagación de las fisuras llevará a una falla por fracturamiento, correspondiente al punto C de la Figura 7. Si se ha proporcionado un buen confinamiento el esfuerzo promedio de adherencia puede aumentar aún más antes de fallar por desprendimiento directo, llegándose al esfuerzo promedio de adherencia máximo τ^* (Baena, 2010; Nilson, 1999).

Aquí cabe mencionar que tanto la falla por fracturamiento como la falla por desprendimiento directo son tipos de fallas del hormigón. Para que se dé efectivamente una

de estas fallas la varilla debe ser capaz de desarrollar las fuerzas de adhesión suficientes sin que se dé el desprendimiento de su superficie.

Consideraciones acerca de los métodos de ensayo

Para determinar la fuerza última de adherencia de varillas de FRP se han utilizado métodos de ensayo muy diversos. Resulta importante tomar en cuenta las ventajas y desventajas de los mismos para poder analizar de mejor manera la información reportada.

Unos de los métodos de ensayo más populares por su simplicidad y menor costo es el ensayo pull out. En su forma más simple consiste en colocar una varilla en un cubo de hormigón como se muestra en la Figura 9.

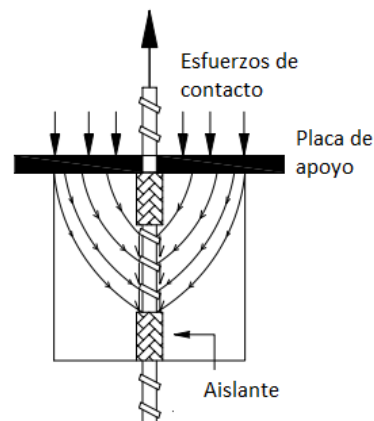


Figura 9. Configuración clásica de un Ensayo de Adherencia Pull Out

Fuente: Baena Muñoz, M. (2010). Study of bond behaviour between FRP reinforcement and concrete. (Tesis inédita de doctorado). Universitat de Girona, España.

Como se puede apreciar en la Figura 9, es común el uso de un aislante que impida la adhesión entre el hormigón y el refuerzo en los extremos del cubo de ensayo con el fin de evitar distorsiones. La máquina de ensayo ejerce una fuerza sobre la varilla hasta que se da una falla por desprendimiento, con lo cual se puede calcular el esfuerzo promedio de adherencia desarrollado. El problema con este tipo de ensayos es que no reflejan correctamente las condiciones en las que trabaja una varilla de refuerzo a flexión. Como se

puede ver en la Figura 9, la configuración del ensayo hace que se desarrollen esfuerzos de compresión en el hormigón lo que lleva a un aumento de magnitud desconocida en la adherencia última que puede desarrollar la varilla (Baena, 2010). La falta de desarrollo de fisuras, propias del hormigón armado a flexión, lleva también a un aumento de la adherencia calculada (Ehsani, Saadatmanesh & Tao, 1996).

De acuerdo con Ehsani et al. (1996) resulta no conservador la determinación de la longitud de desarrollo requerida para refuerzo a flexión basándose en ensayos de adherencia pull out, y recomienda optar por realizar ensayos de adherencia en vigas. Si bien los ensayos de adherencia en vigas representan condiciones más reales, la falta de estandarización hace que las investigaciones y bibliografía que el lector pueda encontrar tenga un gran número de variables posibles. Ejemplos de estas variables son el modo de fallo producido, presencia y cantidad de refuerzo transversal, el valor f'_c del hormigón, etc.

Resultados de investigaciones realizadas

La gran cantidad de variables que se pueden estudiar sumado a la diversidad de varillas FRP hace que sea un verdadero reto identificar conclusiones generales que se apliquen a la globalidad de varillas de FRP, o al menos a algún grupo en particular. Como ejemplo de la variabilidad de resultados que pueden existir se presenta a continuación los resultados de la investigación de Esfahani, Rakhshanimehr & Mousavi (2013).

Esfahani et al. (2013) presenta una investigación donde prueba vigas reforzadas con FRP variando el espaciamiento de estribos de acero de 8mm de diámetro. Para medir la fuerza de adherencia desarrollada por la varilla utiliza un parámetro μ_{test} que es el esfuerzo de adhesión promedio que logra desarrollar la varilla antes de la falla por adhesión:

$$\mu_{test} = \frac{A_b f_s}{\pi d_b L_b} \quad (1)$$

Donde A_b es el área de la sección transversal de la varilla, f_s el esfuerzo total de tensión en la varilla, d_b su diámetro y L_b su longitud de desarrollo. Lo que se está calculado es el esfuerzo promedio que se desarrolla en el área superficial de la varilla antes de la falla. Los resultados de la investigación se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4:
Resultados de ensayos de adherencia de Estefahani et al.

Grupo	Hormigón f'c (MPa)	Varilla		Estribos		μ_{test} (MPa)
		Diámetro (mm)	Superficie	Diámetro (mm)	Espaciamiento (mm)	
I	40	10	Recubrimiento de arena	-	-	6.73
		10		8	80	6.77
		10		8	20	7.29
II	40	16	Corrugadas	-	-	2.18
		16		8	150	3.2
		16		8	100	4.18
		16		8	50	5.28
III	40	12	Corrugadas	8	150	4.31
		12		8	100	5.14
		12		8	50	6.22
IV	70	12	Corrugadas	8	150	4.19
		12		8	100	5.14
		12		8	50	6.64

Como se puede ver en la Tabla 4, para varillas corrugadas el disminuir el espaciado de estribos de 150mm a 50mm produce aumentos de la adherencia desarrollada de hasta 38%. Para las varillas del grupo II se ve un cambio total de 2.18 a 5.28 MPa por la colocación de estribos. Sin embargo, para varillas recubiertas con arena el pasar de una viga sin estribos a una con espaciados de 80mm tiene un cambio

insignificante, y el colocarlos cada 20mm produce un aumento bastante bajo de poco más del 7%.

A más de esto, aumentar el diámetro de las varillas nervadas de 12mm a 16mm muestra efectos adversos en el desarrollo de adherencia, siendo esta la única variable entre los grupos II y III con el fin de permitir una comparación directa. La caída de μ_{test} por el aumento de diámetro parece irse aminorando al mejorar el confinamiento.

Así mismo, los grupos III y IV permiten una comparación directa del efecto de incrementar la resistencia del hormigón $f'c$ de 40 a 70 MPa. Viendo los valores de μ_{test} se ve que no existe un impacto apreciable pese a que prácticamente se está doblando la resistencia del hormigón.

Sobre el efecto del $f'c$ del hormigón, Baena (2010) presenta resultados de algunas otras investigaciones. Las analiza bajo la óptica de los posibles modos de falla antes presentados. En una de estas investigaciones, conducida por EUROCRETE, se vio incrementos en las fuerzas últimas de adhesión al variar $f'c$ de 15MPa ha 30MPa. Al continuar aumentando el valor de $f'c$ por encima de los 30MPa no reportó mejoras en las fuerzas de adhesión. Un análisis de la superficie de las varillas mostró desprendimientos y daños en esta, con lo que se concluyó que pasados los 30MPa el factor limitante pasaba de ser la resistencia del hormigón a ser la capacidad de la varilla de resistir los esfuerzos de cortante en su superficie (Baena, 2010). Otra investigación logró cambiar el modo de fallo, pasando de desprendimiento de las deformaciones superficiales de la varilla a falla del hormigón. El fenómeno se dio por cambiar el ancho de las deformaciones de 3.8mm a

8.9mm lo que evidencia la importancia de la configuración superficial de las varillas (Baena, 2010).

Estos resultados indican que determinar el modo de fallo es crucial para poder llegar a conclusiones adecuadas y lleva a pensar que en la investigación de Esfahani et al. (2013) la falla se produjo por desprendimiento de la superficie de la varilla. Esto explicaría porque el aumentar la resistencia del hormigón no significó un aporte al desarrollo de fuerzas de adhesión.

En todo caso las investigaciones apuntan a que cada varilla es un mundo aparte, con los productores buscando y utilizando distintos mecanismos para producir una adhesión adecuada. La información más valiosa será la que pueda entregar el productor.

Comportamiento a largo plazo

Siendo la promesa de obtener estructuras de vida útil mayor y costos de mantenimiento menores uno de los principales motivos del uso de varillas de FRP, resulta importante considerar sus propiedades a largo plazo. Aunque por su constitución son materiales que no presentan problemas de corrosión, se han identificado otros factores que pueden afectar la vida útil de la estructura en general.

Durabilidad

Una de las características más promocionadas por los productores de FRP es la alta durabilidad de sus productos, llamándolos incluso de “cero mantenimiento”. Si bien las varillas FRP son hechas de materiales que no se corroen, se han identificado otros factores que pueden impactar negativamente su resistencia y comportamiento en general. Uno de

los problemas que enfrentan los diseñadores es la incertidumbre del impacto real que estos factores puedan tener al largo plazo. A diferencia del acero que ha estado en el mercado por muchos años, tanto las varillas de FRP como las estructuras realizadas con ellas son comparativamente nuevas, lo que dificulta la evaluación de su desempeño en condiciones reales y a largo plazo. Comúnmente lo que se intenta hacer es acelerar el deterioro de las varillas sometiéndolas a ambientes agresivos. El fin es reproducir en poco tiempo el estado en el que las varillas se encontrarían luego de varios años de servicio, lo que lleva a cierta incertidumbre en los resultados obtenidos (ACI 440, 2006).

Entre los factores que pueden deteriorar a las varillas de FRP, la exposición a ambientes alcalinos y agua están entre los que han llamado la mayor cantidad de atención por ser condiciones a las que la varilla estará expuesta una vez embebida en el hormigón (ACI 440, 2006). Reducciones de hasta el 70, 50 y 20% en la resistencia inicial a la tensión de las varillas se han registrado para varillas reforzadas con fibras de vidrio, aramidas, y carbón respectivamente (ACI 440, 2006). Estos valores varían de una investigación a otra pues dependen de la varilla con la que se esté trabajando, las fibras y resina que la conforman, el método utilizado para su fabricación, el tipo de recubrimiento que posean (de poseer alguno), los químicos o procesos utilizados para degradarla, tiempos de exposición, temperatura, presencia o ausencia de carga, etc. Para el diseñador será importante conocer lo más a fondo posible el comportamiento esperado de las varillas con las que se encuentra trabajando para poder tomar en cuenta el posible deterioro de la misma.

Los rayos ultravioleta también pueden deteriorar a las varillas de FRP, en especial de la resina de la misma (ACI 440, 2006). Por esto se recomienda evitar su exposición

directa a la luz solar antes de su colocación. Investigaciones realizadas sobre el posible impacto de los rayos ultravioleta en varillas FRP muestran reducciones en la resistencia a la tensión de las varillas del 0 al 20%, 0 al 30% y 0 al 40% para varillas de CFRP, AFRP y GFRP respectivamente (ACI 440, 2006).

Otro punto a discutirse es que, por tener un módulo de elasticidad menor, una estructura de hormigón armado con varillas de FRP puede mostrar un fisuramiento mayor al de una armada con acero. Mayor fisuramiento reduce la protección que el recubrimiento de hormigón pueda brindarle al refuerzo. El diseñador deberá estar al tanto de las sustancias a las que puede estar expuesta la estructura y si estas pueden impactar las propiedades del refuerzo. Agentes que debiliten la resina, por ejemplo, podrían aminorar significativamente las fuerzas de adherencia que la varilla es capaz de desarrollar pues, como ya se explicó anteriormente, la resina juega un papel importante en la transmisión de esfuerzos de la superficie al resto de la varilla.

Fatiga y fatiga estática

Las varillas FRP pueden mostrar un modo de fallo a largo plazo denominado como fatiga estática. En dicho fenómeno la varilla llega a fallar sin dar aviso tras estar sometida a una carga constante por un cierto período de tiempo. El tiempo que le toma a la varilla llegar al fallo desde el momento de aplicación de la carga se denomina tiempo de resistencia. Hasta el momento es claro que para mayores esfuerzos menor es el tiempo de resistencia y la relación entre el esfuerzo y el logaritmo del tiempo de resistencia parece ser lineal-inversa (ACI 440, 2006). Con este criterio se han realizado ensayos y extrapolaciones que indican que varillas de FRP podrían mostrar fatiga estática en 50 años si están sometidas a un esfuerzos que van del 20 al 90% de su capacidad inicial (ACI 440,

2006). Parte de esta enorme variabilidad se debe a que se han utilizado diferentes métodos de ensayo y diferentes varillas. Sin embargo siendo valores de alrededor del 60% bastante comunes, este fenómeno se convierte en uno de alta importancia y del cual el diseñador debe procurar conocer lo más posible.

En cuanto a fallas por fatiga las varillas de FRP muestran resistencias elevadas, indicando ensayos fallas a un millón de ciclos de aplicación de esfuerzos entre el 50 y 70% de la resistencia inicial a tensión para varillas CFRP y entre el 54 y 73% para dos millones de ciclos al trabajar con varillas AFRP (ACI 440, 2006).

Se debe tomar en cuenta que tanto la resistencia a fatiga como a fatiga estática de las varillas se pueden ver afectadas de manera importante si son sometidas a agentes que puedan degradar a la varilla como los expuestos anteriormente. Quedará a consideración de la persona a cargo del proyecto el evaluar si las propiedades de las varillas FRP le brindan la posibilidad de obtener una estructura más sustentable y con una vida útil mayor a la que podría obtener con el uso de varillas de acero.

Consideraciones de diseño para hormigón reforzado con varillas de FRP

El comité ACI 440 (2006) presenta una guía básica de lineamientos de diseño, comparable al presentado en el código ACI 318 para estructuras de hormigón reforzadas con varillas de acero. Los cambios en las consideraciones y procedimientos obedecen a la naturaleza distinta de las varillas de FRP y se explican a continuación.

Diseño a flexión de hormigón armado con varillas de FRP

Las diferencias entre el diseño a flexión de hormigón armado con varillas de FRP y de acero radica principalmente en la falta de ductilidad de las primeras. Como ya se explicó, las varillas de FRP presentan una falla frágil. Por este motivo el comité ACI 440 (2006) permite considerar tanto la falla por ruptura de las varillas como la falla por compresión del hormigón como el mecanismo limitante de diseño. Los parámetros relevantes de las varillas para el diseño son:

- f_{fu} = resistencia de diseño a flexión
- ε_{fu} = deformación unitaria de diseño a flexión
- E_f = módulo de elasticidad

Tanto f_{fu} como ε_{fu} se calculan tomando el valor final indicado por el productor, y multiplicándolo por un factor de reducción por exposición a ambientes agresivos (C_E) conforme a la Tabla 5.

Tabla 5:
Factor de reducción por exposición ambiental

	Varilla	C_E
Hormigón Sin Contacto con Suelo y Agua	CFRP	1
	GFRP	0.8
	AFRP	0.9
Hormigón En Contacto con Suelo y Agua	CFRP	0.9
	GFRP	0.7
	AFRP	0.8

Nota. Fuente: ACI 440 (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-06). EE.UU.: American Concrete Institute.

Así, las ecuaciones presentadas por el comité ACI 440 (2006) son:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (3)$$

Donde f_{fu}^* es la resistencia mínima garantizada de la varilla y ε_{fu} es la deformación mínima garantizada de la misma. Ambos valores se calculan como el valor promedio obtenido de los ensayos menos tres veces la desviación estándar. Para el módulo de elasticidad E_f se toma simplemente el valor promedio.

Con estos parámetros se puede calcular la cuantía de refuerzo balanceada cómo:

$$\rho_{fb} = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (4)$$

Donde ε_{cu} es la deformación última del hormigón y β_1 un factor que depende de la resistencia del hormigón, igual a 0.85 para f'_c igual o menor a 28MPa, cayendo hasta 0.65 para resistencias mayores a una tasa de 0.05 por cada 7MPa de aumento en resistencia. Este valor se debe comparar con la cuantía de refuerzo colocada que es:

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (5)$$

Donde A_f es el área total de refuerzo FRP colocado, b en ancho de la sección y d la distancia de la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo. Para valores de $\rho_f > \rho_{fb}$ la falla se producirá por aplastamiento del hormigón en la zona de compresión y la resistencia nominal a flexión de la viga será:

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f_c} \right) b d^2 \quad (6)$$

Donde f_f es el esfuerzo de tensión que se desarrolla en las varillas de FRP y se lo calcula como:

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f_c'}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (7)$$

Cuando $\rho_f < \rho_{fb}$ la falla se produce por rompimiento del refuerzo a tensión. La resistencia nominal a flexión se calcula como:

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (8)$$

Siendo c la distancia al eje neutro de la viga. Sin embargo el valor de $\beta_1 c$ varía dependiendo de las propiedades de la varilla FRP y puede resultar complicado determinar su valor exacto por lo que el comité ACI 440 (2006) recomienda simplificar este valor a $\beta_1 c_b$ donde c_b sería la distancia al eje neutro si el hormigón llegara a su deformación máxima $\varepsilon_{cu} = 0.003$. Así un cálculo conservador y simplificado para la resistencia nominal a flexión se puede realizar cómo:

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (9)$$

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (10)$$

Finalmente, la resistencia nominal del elemento a flexión debe ser aminorada por un factor ϕ antes de compararla con el momento factorado que debe ser capaz de resistir, de modo que se garantice que $\phi M_n \geq M_u$. Por los modos de falla que se da en una viga armada con FRP, el factor de reducción de resistencia es mucho más estricto que para una viga armada con acero y sus valores son mucho menores al 0.9 habitual. Los valores para ϕ varían de 0.55 para una falla controlada por fractura del refuerzo a tensión hasta 0.65 para configuraciones que garanticen una falla por aplastamiento del hormigón a compresión (ACI 440, 2006). La idea de estos valores es compensar la falta de ductilidad de la estructura. Los valores de ϕ se pueden calcular a partir de la Figura 10.

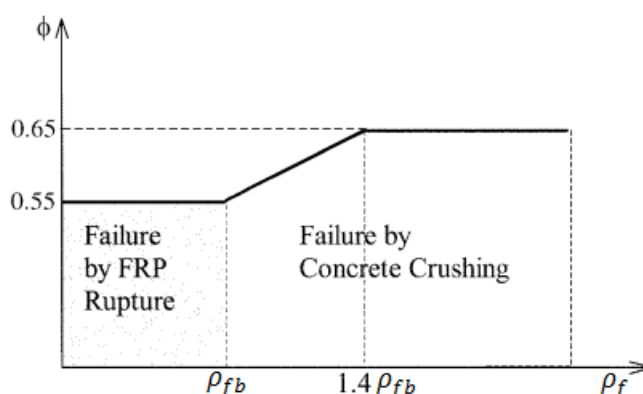


Figura 10. Factor de reducción de la resistencia nominal a flexión

Fuente: ACI 440 (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-06). EE.UU.: American Concrete Institute.

Como se puede ver, el valor máximo de 0.65 se alcanza un valor de 1.4 veces de ρ_{fb} , esta medida se toma para garantizar que el modo de fallo sea efectivamente por aplastamiento del hormigón en la zona de compresión.

Como consideración adicional se debe notar que, debido a que no existe fluencia del refuerzo, el colocar distintas capas del mismo hace que las capas inferiores experimenten esfuerzos mayores a las superiores (ACI 440, 2006). Los cálculos realizados con las ecuaciones antes presentadas deben tomar esto en cuenta y calcular el esfuerzo que

se desarrolla en cada capa de refuerzo al considerar su distancia al eje neutro. Cada capa produce así un aporte al M_n final, que para un número n de capas se vería cómo $M_n = \sum_{i=1}^n M_{ni}$.

Además de esto el comité ACI 440 (2006) advierte que no se deben considerar redistribuciones de esfuerzos al diseñar vigas u otros elementos. Esto se debe a que, por su relación esfuerzo-deformación lineal hasta la falla, las varillas de FRP no forman rótulas plásticas.

Consideraciones especiales de fisuramiento

El comité ACI 440 (2006) permite aumentar el ancho máximo de las fisuras que se desarrollan en una estructura armada con FRP debido a que no son materiales corrosivos. El código recomienda limitar el ancho de las fisuras a 0.5mm para elementos expuestos a la intemperie y 0.7mm para elementos internos, comparados con el valor de 0.4mm para estructuras reforzadas con acero. El cálculo de este parámetro se realiza con la siguiente ecuación:

$$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (11)$$

Siendo w el máximo ancho esperado en las fisuras, β el radio entre la distancia del eje neutro a las fibras extremas a tensión y la distancia entre el eje neutro al centro del refuerzo a tensión, d_c el espesor del recubrimiento hasta el centro de la primera capa de varillas y s el espaciamiento entre varillas. Por último k_b es un factor de la calidad de la adherencia que puede desarrollar la varilla de FRP con el hormigón circundante. El comité ACI 440 (2006) menciona que para varillas de FRP que presenten un comportamiento

similar al acero el factor debe ser igual 1, siendo mayor si las características de adherencia de la FRP son peores, y menor a 1 si presenta características superiores. El procedimiento común llevado a cabo para determinar el valor de este coeficiente es el de preparar vigas de ensayo y cargarlas con el fin de ir determinando w para distintos valores de carga. Después, de la ecuación presentada se puede despejar el valor de k_b (McCallum, 2013).

Como se puede apreciar en la ecuación, el limitar el ancho de las fisuras puede terminar siendo el factor que controle el diseño del elemento estructural. Las varillas FRP combinan valores de módulo de elasticidad bajos con resistencias últimas altas a la tensión. Como se puede apreciar en la Tabla 3 antes presentada, los valores del módulo de elasticidad de una varilla de FRP puede llegar a ser 1/5 del valor del acero, lo que llevaría a anchos de fisuras 5 veces mayores si todo lo demás se mantiene igual. Hacer que las varillas desarrollen valores altos de f_f agravaría el problema. Este es uno de los motivos por los que actualmente resulta complicado utilizar eficientemente la gran capacidad a tensión de estas varillas (Portnov, 2013).

Longitud de desarrollo y traslapes

La ecuación que presenta el comité ACI 440 (2006) para relacionar el esfuerzo que una varilla FRP es capaz de desarrollar y la longitud de desarrollo se muestra a continuación:

$$f_{fe} = \frac{0.83\sqrt{f'_c}}{\alpha} \left(13.6 \frac{l_e}{d_b} + \frac{c}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad (12)$$

Donde f_{fe} es el esfuerzo máximo que una varilla de diámetro d_b embebida una distancia l_e es capaz de desarrollar antes de que se produzca una falla por desprendimiento. El factor α es un factor por ubicación que debe ser tomado igual a 1.5 para varillas que tengan más de 300mm de hormigón bajo ellas, caso contrario el valor del factor es igual a 1. Esta medida se ha tomado por estudios que demuestran que al ser fundido un cuerpo de hormigón existen partículas de aire y agua que migran hacia la superficie, ocasionando una disminución de la capacidad de adherencia del refuerzo al entrar en contacto con su superficie (ACI 440, 2006). El comité ACI 440 (2006) habla también de la posible futura inclusión de un factor por el tipo de varilla FRP utilizada (CFRP, AFRP, GFRP) reconociendo que pueden tener comportamientos distintos, sin embargo hasta la fecha de publicación del código ACI440.1R-06 no se contó con experiencia y resultados experimentales suficientes para incluirlo.

Así, el código propone una ecuación de aplicación sencilla pero que ha sido muy cuestionada hasta la fecha. La investigación de Esfahani et al. (2013) incluso concluye que utilizar la ecuación propuesta en el código ACI440.1R-06 puede llevar a sobreestimaciones importantes de las fuerzas de adherencia que pueden ocasionar el fallo del elemento estructural. En esta investigación se muestran sobreestimaciones de hasta el 50% al comparar resultados de fuentes bibliográficas diversas con los resultados predichos por la ecuación (12) (Esfahani et al.,2013). Sin embargo, estas variaciones tan fuertes se dan únicamente para ensayos realizados con vigas sin refuerzo transversal alguno y la misma investigación muestra un buen ajuste de la ecuación al colocar un refuerzo transversal mínimo. Por ejemplo, para los grupos II, III y IV de vigas presentadas en la Tabla 4, los resultados son los siguientes:

Tabla 4:
Resultados de ensayos de adherencia de Estefahani et al.

Grupo	Hormigón f'c (MPa)	Varilla		Estribos		μ_{test} (MPa)	μ_{eq} (MPa)
		Diámetro (mm)	Superficie	Diámetro (mm)	Espaciamiento (mm)		
II	40	16	Corrugadas	-	-	2.18	4.45
		16		8	150	3.2	4.44
		16		8	100	4.18	4.45
		16		8	50	5.28	4.55
III	40	12	Corrugadas	8	150	4.31	3.88
		12		8	100	5.14	3.89
		12		8	50	6.22	3.89
IV	70	12	Corrugadas	8	150	4.19	5.17
		12		8	100	5.14	5.14
		12		8	50	6.64	5.15

Donde μ_{eq} es el esfuerzo de adherencia promedio calculado para las varillas basándose en los resultados de la ecuación (12). Como se puede apreciar las sobreestimaciones desaparecen para espaciamientos de estribos de 100mm o menores, donde la ecuación pasa a ser conservadora. Basándose en estos resultados Esfahani et al. (2013) termina por establecer la necesidad de modificar la ecuación de modo que incluya el efecto del refuerzo transversal además de proponer aminorar el valor de f_{fe} por un factor de 0.59 cuando no se posee refuerzo transversal alguno.

Otra observación que se puede realizar es que, contrario a lo que la ecuación (12) propone, varias investigaciones que ya se han discutido han mostrado que las fuerzas de adherencia pueden no mejorar al incrementar el f'c del hormigón. Como ya se discutió, este fenómeno se puede deber a que la varilla empieza a fallar por desprendimiento de su superficie, sin embargo la ecuación (12) no considera el posible acontecimiento de este fenómeno que tampoco es mencionado en el código ACI440.1R-06. Sin embargo, se reconoce la dificultad de tomar en cuenta este parámetro pues la resistencia a este tipo de

falla es una propiedad única de cada varilla que depende del método de manufactura que haya empleado en productor y de los materiales utilizados para la formación de la misma.

Se puede cuestionar además la intención del ACI de incluir únicamente un factor de modificación para cada tipo de varilla (AFRP, CFRP, GFRP). Entre varillas de un mismo tipo pueden existir mecanismos de adherencia completamente distintos, como por ejemplo recubrimiento de la superficie de la varilla con arena y formación de ondulaciones en su superficie, y podrían presentar comportamientos muy distintos.

En fin, resulta contra-intuitivo que una sola ecuación que no considera ningún parámetro de la varilla, a excepción de su diámetro, sea capaz de producir predicciones adecuadas para todo el universo de varillas FRP que existen. Varillas diferentes producen fuerzas de adhesión distintas. En el trabajo de Baena (2010) se pueden ver los resultados de 88 ensayos de adherencia tipo pull out que se resumen en la Figura 11.

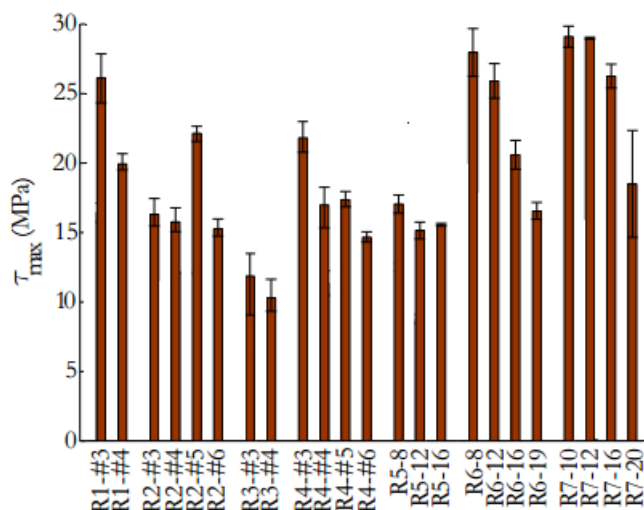


Figura 11. Resultados de ensayos tipo pull out

Fuente: Baena Muñoz, M. (2010). Study of bond behaviour between FRP reinforcement and concrete. (Tesis inédita de doctorado). Univesitat de Girona, España.

En la Figura 11 el valor de τ_{\max} corresponde a la adherencia última desarrollada antes de que se dé la falla por desprendimiento directo (cómo se indica en la Figura 7).

Cada barra corresponde a un tipo de varilla con un diámetro determinado, los diámetros anteceditos por el símbolo # corresponden a octavos de pulgada, los otros están en milímetros. Así podemos comparar, por ejemplo, las varillas tipo R1, R2 y R3. Para diámetros iguales las varillas R1 presentan una adherencia mayor a las varillas R2, que a su vez superan a las varillas R3. Lo mismo ocurre con las varillas R5, R6 y R7 que presentan sus diámetros en milímetros, es sencillo notar que varillas de diámetros iguales producen adherencias últimas distintas.

Se puede concluir así que, aunque el comité ACI 440 (2006) presente una ecuación de fácil aplicación, ésta presenta sus falencias y limitaciones; parte de esto se debe a la gran variedad y falta de estandarización de varillas de FRP. Aquí se ve nuevamente la importancia de trabajar con un productor que posea la mayor cantidad de información posible acerca del producto que se encuentra comercializando, con el fin de ayudar al ingeniero de diseño.

CAPÍTULO 3: REVISIÓN LITERARIA DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA.

Introducción

Esta revisión literaria se basa principalmente en el documento ACI 363R-10 (ACI 363, 2010) que se constituye en un reporte completo que resume la información más actualizada referente a hormigones de alta resistencia (en adelante abreviado como HSC por sus siglas en inglés). Para ampliar su contenido se han revisado además los reportes ACI 211.4R-08 (ACI 211, 2008) que es una guía para la selección y dosificación de materiales utilizados para la creación de mezclas de HSC y el reporte ACI 234R-06 (ACI 234, 2006) que se especializa en el uso de microsílíce en el hormigón. Como se ha optado por utilizar únicamente microsílíce para el desarrollo de la mezcla de HSC que se presenta en esta tesis, también se ha utilizado el “Silica Fume User’s Manual” (Hollan, 2005).

De la información obtenida se espera no solamente contar con la última información referente al comportamiento y desarrollo de HSC sino también ser capaz de establecer un método científico, lógico y consistente que permita obtener una mezcla de hormigón que supere los 90MPa y que tenga una fluidez y trabajabilidad adecuada que permita la conformación de la estructura propuesta para la competencia internacional del ACI.

A continuación se realizará un análisis histórico del uso y desarrollo HSC, de su naturaleza, de los materiales, métodos y procesos utilizados para su creación, y de sus propiedades, realizando un enfoque en aquellas que se consideren más fundamentales para la estructura que se pretende realizar.

Historia del uso y desarrollo del HSC

En la década de 1950 un hormigón era considerado de alta resistencia al llegar a los 34MPa, desde allí la definición ha ido evolucionando hasta que hoy en día el ACI lo define como un hormigón de resistencia f'_c igual superior a los 55 MPa (ACI 363, 2010). A medida que la tecnología y los conocimientos de la ingeniería de materiales han ido avanzando se han conseguido hormigones de resistencias cada vez más altas. Actualmente se han empleado hormigones de 123MPa de resistencia para la fundición en sitio de elementos estructurales de edificios y en laboratorios se ha llegado a resistencias extremas de 800MPa (ACI 363, 2010).

En la práctica, el HSC ha sido utilizado principalmente para la fundición de edificios de gran altura, puentes de luces largas, y estructuras situadas en el mar o costa afuera (ACI 363, 2010). El comité ACI 363 (2010) presenta un listado de más de 50 edificios construidos alrededor del mundo empleando HSC, siendo el más antiguo en ser mencionado el “Midcontinental Plaza” de Chicago, construido en 1972 con un hormigón de 62MPa de resistencia. Edificios más modernos como el “Herriot’s” de Frankfurt (2002) y el “Brillia Tower” de Tokyo (2004) utilizaron hormigones de 125 y 130MPa respectivamente. En estos edificios de gran altura el uso de HSC ha sido enfocado especialmente en las columnas y muros con el fin de maximizar los espacios libres disponibles en planta, puesto que las mayores resistencias de estos hormigones permiten soportar las cargas de diseño con elementos estructurales de menor sección transversal. En un edificio canadiense, por ejemplo, el espacio utilizable para parqueaderos pudo incrementarse en un 30% al utilizar HSC en comparación a un hormigón convencional (ACI 363, 2010).

En puentes también se ha reportado el uso exitoso de HSC alrededor del mundo. Más de 40 ejemplos son presentados por el comité ACI 363 (2010). Entre los más antiguos tenemos el puente “Nitta Highway Bridge” construido en el Japón en 1968 con una resistencia de 59 MPa. El puente que reporta el mayor valor de $f'c$ es el “CNT Super Bridge” de Japón, construido en 1993 con luces de 40m y una resistencia del hormigón de 102MPa. El puente “Great Belt Link” de Dinamarca alcanza la increíble luz de 1624m utilizando HSC de 65MPa ACI 363 (2010). En estos puentes y muchos otros alrededor del mundo, la consecución de grandes luces se explica en gran medida por el uso de elementos estructurales de hormigón pretensado que permiten al hormigón trabajar a compresión y tener menores o ninguna reducción en su inercia al evitar el fisuramiento. Para poder explotar realmente las ventajas del hormigón pretensado se necesita del empleo de mezclas de HSC capaces de alcanzar valores de $f'c$ elevados, incluso en etapas tempranas de su vida, de modo que puedan resistir los esfuerzos de pretensión.

A medida que se facilita el conseguir en campo y de manera consistente hormigones con valores mayores de $f'c$, las posibilidades ingenieriles y arquitectónicas se expanden. Sin embargo, todo este avance debe ir acompañado de un estudio continuo de las propiedades y desempeño de estos nuevos hormigones con el fin de garantizar el diseño de estructuras seguras, económicas y sustentables.

Naturaleza del HSC

Como ya se ha mencionado con anterioridad, actualmente el HSC es definido cómo aquél capaz de igualar o superar el valor de $f'c$ de 55MPa, definición que el comité ACI 363 (2010) ha modificado desde la última edición de su reporte en 1992, donde el HSC era considerado como un hormigón capaz de exceder los 41MPa. La resistencia de 55MPa ha

sido tomada porque se considera que, para trabajar con resistencias iguales o mayores a ésta, se requiere de consideraciones especiales para su producción y uso.

Los HSC presentan cambios en varias de sus propiedades aparte de la resistencia a la compresión. Los valores de su módulo de elasticidad, módulo de ruptura, resistencia a la tensión, resistencia a la erosión y abrasión, permeabilidad, comportamiento a flexión, deflexiones y demás, también pueden diferir en mayor o menor medida de los hormigones de resistencias comunes. El comité ACI 363 (2010) reconoce que los cambios en éstas y otras propiedades, no se dan de forma abrupta al alcanzar los 55MPa de resistencia, sino que se van dando de manera gradual a medida que el valor de f'_c va aumentando. Sin embargo, para hormigones con resistencias menores a los 55MPa, muchas de sus propiedades y comportamientos se pueden estimar sin mayor distorsión con las ecuaciones clásicas, aplicadas a hormigones de resistencias comunes, como las establecidas en el código ACI318S-11. Para resistencias mayores, estas ecuaciones pueden necesitar una revisión o no ser aplicables, por presentar variaciones importantes con los resultados experimentales ACI 363 (2010). Ya se tratarán estos temas más a fondo en la revisión de las propiedades de los HSC. De momento, el lector sólo debe tener en mente que el HSC, aunque similar en naturaleza y comportamiento a los hormigones comunes, va sufriendo cambios en sus propiedades a medida que el valor de f'_c aumenta. La magnitud y naturaleza de estos cambios dependen también de los métodos y materiales utilizados para su creación. Por ejemplo, no se espera que un hormigón que haya alcanzado los 90MPa empleando microsílíce se comporte exactamente igual a otro hormigón de resistencia igual pero que haya empleado otros cementantes adicionales, o agregados distintos, etc. Esto complica el estudio de HSC, pues existen maneras muy diversas de alcanzar los valores de f'_c deseados, que harán variar en mayor o menor medida las propiedades del hormigón. Sin

embargo, se pueden hacer generalizaciones importantes, de manera que se entienda mejor la naturaleza de estos hormigones.

En otro punto, aunque se reconoce que valores altos de f_c tienen relaciones estrechas con algunas propiedades del hormigón, como una mejorada resistencia a la erosión-abrasión, no se debe confundir la definición de HSC con la de hormigones de alto desempeño (HPC por sus siglas en inglés). Los HPC son definidos como hormigones especiales que cumplen con requerimientos que no pueden ser obtenidos por hormigones comunes, y necesitan de materiales o métodos de producción especiales (Zhang, 2013). Es decir, que las características de un HPC dependen de las necesidades de un proyecto en específico, los requerimientos pueden ir desde permeabilidades mayores o menores, hasta durabilidades extendidas o propiedades mecánicas especiales (entre las que puede estar una alta resistencia a la compresión). Ya que para esta tesis el parámetro fundamental para el desarrollo de la mezcla de hormigón a ser utilizado es una alta resistencia a la compresión, se está hablando propiamente de un HSC más que de un HPC que tiene una definición mucho más general. Con esto en mente se procede a exponer los materiales más populares en la conformación de mezclas de HSC.

Materiales y métodos utilizados para producción

Comúnmente, la obtención de hormigones de alta resistencia supone la utilización de materiales adicionales o distintos a los que se utilizan para una mezcla de hormigón común. Estos materiales típicamente son agregados finos y gruesos especiales, cementantes adicionales, y aditivos reductores de agua. Consideraciones especiales se deben hacer también en el tipo de cemento utilizado pues, aunque diferentes tipos de cemento pueden llevar a la obtención de HSC, se reconoce que unos tipos pueden trabajar

mejor que otros. A continuación se procede a tratar más a fondo cada uno de estos materiales.

Agregado grueso

El agregado grueso es el componente que mayor volumen ocupa en el producto final y sus propiedades afectan de manera importante el resultado final de la mezcla. Cuando se trata con HSC, cambios pequeños en cualquiera de sus componentes pueden producir variaciones importantes. El producto final es mucho más sensible que un hormigón de resistencia común y por tanto controles y estándares de calidad toman mayor importancia (ACI 211, 2008).

Para la formación de HSC se prefieren agregados fuertes, sin fisuras ni superficies débiles (ACI 211, 2008). Además es importante que tengan un nivel de limpieza adecuado y que su superficie se encuentre libre de partículas y sustancias extrañas que impidan su correcta fundición con la pasta del cemento (ACI 211, 2008).

A diferencia de un hormigón común, en un HSC se puede conseguir que la resistencia de la pasta de cemento que une los agregados tenga una resistencia bastante alta, así como mejoradas fuerzas de adherencia entre los agregados y la pasta (ACI 363, 2010). Esto hace que, a diferencia de un hormigón común donde el limitante típicamente será la pasta de cemento, la falla se pueda dar por rotura de los agregados. De aquí que, si la resistencia del agregado puede ser el factor limitante, la capacidad última de estos cobra una mayor importancia.

Se recomienda además limitar el tamaño nominal máximo del agregado a 1/2 in, prefiriéndose 3/8 para alcanzar resistencia mayores (ACI 363, 2010). La razón de trabajar con agregados gruesos de menor tamaño es que poseen mayor área superficial lo que mejora su adherencia con la pasta cementante, además de ser menos propensos a mostrar fisuras internas o zonas débiles que aceleren su falla. Ayuda también a distribuir mejor los esfuerzos que se generan por la diferencia entre los módulos de elasticidad de la pasta y los agregados (ACI 363, 2010).

Agregados Finos

Los agregados finos pueden impactar de manera importante la demanda de agua de la mezcla y por tanto su correcta selección es vital (ACI 211, 2008). Comúnmente se prefieren agregados con un módulo de finura entre 2.5 y 3.2; valores menores podrían llevar a caídas en la trabajabilidad del hormigón, obligando a la adición de agua (ACI 211, 2008). A más de esto, el agregado debe presentar una granulometría adecuada pues el empaquetamiento del producto final es de vital importancia (ACI 211, 2008).

Agua

La calidad del agua usualmente no es un parámetro que se considere muy importante, pues se ha demostrado que el agua potable común tienen las características adecuadas para la obtención de HSC (ACI 211, 2008).

Sin embargo, la cantidad de agua que se incorpore a la mezcla es de vital importancia, pues la relación agua-cemento (w/c) es uno de los parámetros principales que se tratan en la obtención de mezclas de HSC. El agua cumple dos funciones principales en una mezcla de hormigón. La primera es la de iniciar el proceso de hidratación de los

cementantes, y la segunda es darle una trabajabilidad adecuada a la mezcla. La cantidad de agua que se adicione por motivos de trabajabilidad aumenta el radio w/c y termina por disminuir la resistencia de la mezcla final. Así, uno de los objetivos es seleccionar los materiales que permitan una trabajabilidad suficiente con la menor cantidad de agua posible, como ya se explicó al hablar de los agregados finos. Para una mezcla de HSC, al trabaja con microsílíce se buscan valores de 0.2 para el radio w/c (ACI 211, 2008).

Con la idea de que el lector pueda visualizar más claramente el efecto del radio w/c se presenta en la Figura 12 el resultado de una investigación incorporada por el ACI 363 (2010).

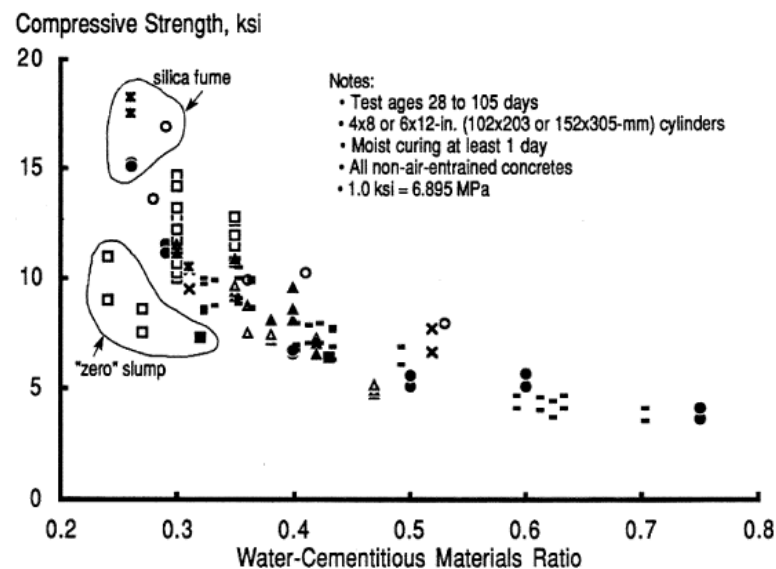


Figura 12. Resistencia f'_c para diversos valores de w/c
Fuente: ACI 363 (2010). Report on high-strength concrete (ACI 363R-10). EE.UU.: American Concrete Institute.

Como se puede observar, hay mezclas con valores iguales en sus relaciones w/c que producen resistencias diferentes. Esto se debe a que existen otros factores que alteran la resistencia final. Sin embargo, es clara la tendencia al incremento del valor de f'_c para valores menores de w/c .

Cemento Portland

En una mezcla de hormigón se producen reacciones químicas cuando el agua entra en contacto con el cemento e inicia el proceso de hidratación. En una mezcla de HSC, que puede incorporar cementantes adicionales y aditivos, las reacciones químicas y físicas se vuelven más complejas. Este hecho puede afectar la resistencia y características finales del hormigón. Incluso trabajando con cementos de un solo tipo, pero de distintos productores o ubicaciones geográficas, los resultados pueden ser muy distintos. Sobre esta nota el comité ACI 363 (2010) presenta resultados de una investigación donde se realizaron 4 mezclas de hormigón idénticas, todas incorporando cemento portland tipo I, variando únicamente la marca del cemento. Los resultados se presentan en la Figura 13.

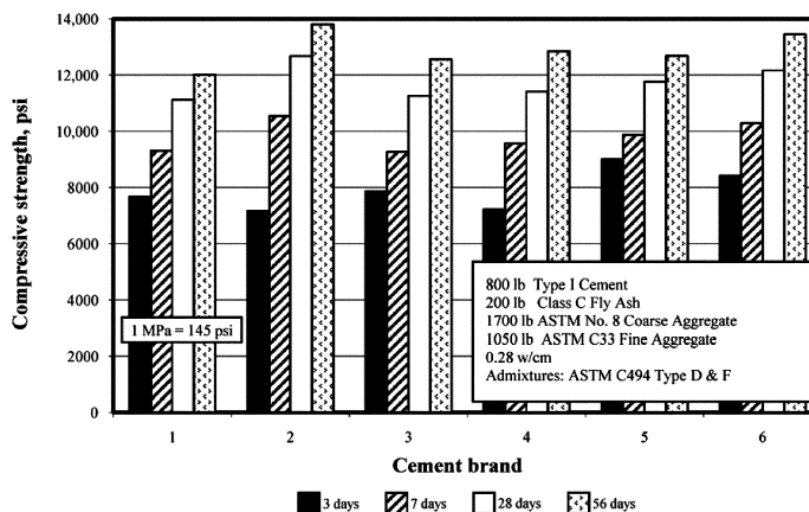


Figura 13. Variaciones en el valor de f'_c debidas a cambios en la marca de cemento
 Fuente: ACI 363 (2010). Report on high-strength concrete (ACI 363R-10). EE.UU.: American Concrete Institute.

Como se puede ver, entre las 6 marcas de cemento comparadas la diferencia máxima llega a ser de casi 13.8MPa (2000psi). Esta es una de las razones por las que la obtención de una mezcla de HSC consiste en un proceso de ensayos sucesivos, con el fin de realizar la selección más adecuada de materiales y proporcionarlos de la manera más eficiente en la mezcla final (ACI 211, 2008).

Como recomendación general, es conocido que una presencia mayor al 8% de C3A en la composición química del cemento no es recomendable para el desarrollo de hormigones de alta resistencia, pues la rápida reacción de este compuesto durante el proceso de hidratación produce un aumento del área superficial de las partículas (ACI 211, 2008). Este fenómeno aumenta la demanda de agua necesaria para rodear dichas partículas y termina por producir un aumento en la viscosidad de la mezcla. Los resultados de la investigación de Willie, K. et al. (2011) muestran que cementos con un contenido bajo de C3A facilitan la obtención de relaciones agua/cementante bajas y llevan a alcanzar resistencias finales mayores.

Además, por lo delicado y complejo de las reacciones químicas, el productor debe ser capaz de garantizar una uniformidad del cemento acorde con ASTM C917 (ACI 363, 2010). Por ejemplo, se ha visto que para un cemento portland, una variación mayor al 4% en el contenido de C_3S , una variación en la pérdida por ignición de más del 0.5%, o cambios en el contenido de SO_3 de más de 0.2%, son suficientes para afectar las propiedades finales del hormigón (ACI 363, 2010).

Cementantes adicionales

Actualmente existen una gran cantidad de cementantes adicionales que se utilizan para darle propiedades especiales al hormigón, entre éstas, una mejorada resistencia a la compresión. Sin embargo, por su efectividad y propiedades, los más utilizados en la formación de HSC son la microsílíce, ceniza volante y el cemento de escoria de altos hornos. Actualmente está demostrado que estos tres cementantes pueden trabajar en

conjunto, e incluso varias predosificaciones que se encuentran en la literatura recomiendan un uso combinado de dos o más de estos para obtener las propiedades finales deseadas.

Es importante notar que cada uno de estos cementantes tiene sus propiedades únicas y, por tanto, poseen comportamientos y consideraciones especiales diferentes. Tanto la forma en la que producen una adición en la fuerza de compresión final, como los efectos que tienen en el hormigón fresco varían. Por ejemplo, el reemplazar cemento portland por ceniza volante puede llevar a una reducción en la demanda de agua debido a que sus partículas de forma esférica ayuda a mejorar la trabajabilidad (ACI 211, 2008). La microsílíce, por otro lado, produce mezclas más viscosas por su alta área superficial y conlleva a un aumento en la demanda de agua (ACI 211, 2008).

Esta revisión literaria se concentrará en la microsílíce como cementante adicional, por ser el que será utilizado para la realización de la mezcla final de hormigón. Información adicional de otros tipos de cementantes puede encontrarse en el mismo código ACI 2114R-08 o en el código ACI 232.1R.

Microsílíce

Tradicionalmente, la microsílíce es definida como un puzolánico producto de desecho de la industria de metales silicoferrosos, utilizada en el desarrollo de hormigones, principalmente para mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad del producto final (ACI 234, 2006). De hecho, históricamente su uso se inició como consecuencia de normas más estrictas referentes a la protección ambiental y la contaminación del aire (ACI 234, 2006). Sin embargo, para el 2006 la cantidad de producción de microsílíce era ya de 130000 toneladas anuales. Actualmente las normas referentes a su control de calidad y

métodos de producción se han ido refinando con lo que suele ser más bien vista como un producto derivado (Zhang, 2013).

Las características principales de la microsílíce de acuerdo a Holland (2005) son:

- La microsílíce es un sólido amorfo, lo que quiere decir que, a diferencia de un sólido cristalino, sus partículas carecen de un orden bien definido. Este factor hace de la microsílíce un sólido altamente reactivo.
- Tiene un contenido alto de óxido de silicio (SiO_2), con la mayoría de normas exigiendo que sea al menos el 85% del compuesto final (Holland, 2005; ACI 234, 2006).
- Tiene partículas extremadamente finas, de menos de $1\mu m$ de diámetro, aproximadamente $1/100$ del radio de una partícula de cemento. Sin embargo, estas pueden encontrarse aglomeradas en tamaños que van de 1 a $100\mu m$ dependiendo del método de producción (Holland, 2005; ACI 234, 2006).
- Tienen una alta área superficial, que llega a valores de $20000m^2/kg$ (Holland, 2005; ACI 234, 2006).

El mecanismo principal por el que la microsílíce aumenta la resistencia del hormigón es la reacción química que el SiO_2 realiza al entrar en contacto con el hidróxido de calcio (CH) (ACI 211, 2008; ACI 234, 2006). El (CH) es uno de los productos de hidratación del cemento que no aporta a la resistencia final, al reaccionar con este compuesto la microsílíce es capaz de adicionar más silicato cálcico hidratado (CHS). Es por esto que el contenido de SiO_2 de la microsílíce es el factor principal a ser tomado en cuenta al hablar de su composición. Cabe mencionar que, al ser un sólido amorfo y poseer una alta área superficial, se constituye en un elemento altamente reactivo.

Un segundo mecanismo por el cuál la microsílíce aporta al aumento de resistencia es físico, y consiste en mejorar el empaquetamiento del hormigón (Holland, 2005). Hollan (2005) explica que, al igual que los agregados finos llenan espacios entre los agregados gruesos, la microsílíce es capaz de ocupar espacios mucho más pequeños que en un hormigón común quedarían entre partículas de cemento.

Sin embargo, como ya se mencionó, la gran área superficial de la microsílíce puede llevar a un aumento en la demanda de agua. Para contrarrestar este efecto es que típicamente al trabajar con microsílíce para la obtención de HSC, se debe incluir un aditivo reductor a agua de modo que pueda alcanzarse una trabajabilidad adecuada con valores bajos de w/c (Holland, 2005; ACI 234, 2006).

Pese a que actualmente se cuenta con especificaciones suficientes para garantizar su utilización adecuada, se debe tener en cuenta la variabilidad en sus propiedades. La composición química y propiedades físicas de la microsílíce dependen de un número alto de variables como el tipo de aleación del que se deriva, los métodos utilizados para su producción, densificación y recolección, y el estado general de la maquinaria utilizada durante todo el proceso (Holland, 2006). Un estudio de la variabilidad en las propiedades físicas y químicas de la microsílíce fue llevado a cabo por el comité ACI 234 (2006). En dicho estudio se han tomado los resultados del análisis de más de 150 muestras provenientes de productores distintos, y sus resultados se pueden ver en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6:
Ejemplo de variaciones en la composición química de microsílíce.

Tipo de Aleación	Si		FeSi-75%		Si y FeSi-75%		FeSi-75%		Si	
Numero de muestras	42		42		32		6		28	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
SiO ₂	93.65	3.84	93.22	1.71	92.1	1.29	91.4	0.92	94.22	0.34
Al ₂ O ₃	0.28	0.13	0.31	0.2	0.25	0.12	0.57	0.03	0.36	0.04
Fe ₂ O ₃	0.58	2.26	1.12	0.86	0.79	0.7	3.86	0.41	0.1	0.01
CaO	0.27	0.07	0.44	0.34	0.38	0.11	0.73	0.08	0.27	0.05
MgO	0.25	0.26	1.08	0.29	0.35	0.1	0.44	0.05	0.2	0.02
Na ₂ O	0.02	0.02	0.1	0.06	0.17	0.04	0.2	0.02	-	-
K ₂ O	0.49	0.24	1.37	0.45	0.96	0.22	1.06	0.05	-	-
S	0.2	0.16	0.22	0.06	-	-	-	-	-	-
SO ₃	-	-	-	-	0.36	0.1	0.36	0.16	-	-
C	3.62	0.96	1.92	1.15	-	-	-	-	3.05	0.25
Pérdida al Fuego	4.36	1.48	3.1	0.9	3.2	0.45	2.62	0.42	3.6	0.33

Nota. Fuente: ACI 234 (2006). Guide for the use of silica fume in concrete (ACI 234R-06). EE.UU.: American Concrete Institute.

Tabla 7:
Ejemplo de variaciones en las propiedades físicas de microsílíce.

Tipo de Aleación		Si	FeSi-75%	Si y FeSi-75%	FeSi-75%
Número de Muestras		24	24	32	30
Porcentaje retenido en Tamiz No. 325 (45 µm)	Promedio	5.4	1.8	5.62	3.73
	Desviación Estándar	4	1.5	1.69	4.48
Área superficial medida utilizando el método de absorción de nitrógeno (m ² /Kg)	Promedio	20000	17200	-	-
	Desviación Estándar	2100	-	-	-
Gravedad Específica	Promedio	-	-	2.27	2.26
	Desviación Estándar	-	-	0.02	0.08
Índice de actividad puzolánico con Cemento Portland (%)	Promedio	102.8	96.5	91.9	95.3
	Desviación Estándar	5.1	13.7	10	4
Índice de actividad puzolánico cal (MPa)	Promedio	8.9	-	7	9.1
	Desviación Estándar	0.8	-	0.8	0.9
Demanda de Agua (%)	Promedio	138.8	139.2	140.1	144.4
	Desviación Estándar	4.2	7.2	2.6	2

Nota. Fuente: ACI 234 (2006). Guide for the use of silica fume in concrete (ACI 234R-06). EE.UU.: American Concrete Institute.

Como se pueden ver, existen variaciones importantes en la composición química final y en las propiedades físicas, incluso entre microsílces que se derivan del mismo tipo de aleación. Para algunos casos, la variación estándar de las mediciones es incluso mayor al valor promedio. Sin embargo, en el porcentaje de SiO_2 en la composición química de la microsílce, que es el factor fundamental, los cambios son más bien moderados, manteniéndose entre el 90 y 94% para las más de 150 muestras analizadas ACI 234 (2006).

El comité ACI 234 (2006) reconoce que, a más de la correlación entre el porcentaje de SiO_2 y la capacidad de la microsílce de aumentar de resistencia del hormigón, hasta la fecha no se ha establecido con claridad el efecto que el resto de la composición química de la microsílce pueda tener en el hormigón. Por su parte, Willie, K. et al. (2011) realizó diversas mezclas con tres tipos de microsílce distintas y no encontró que afecten de manera notable las propiedades del hormigón producido.

Pese a esto, la alta variabilidad en las propiedades físico-químicas de la microsílce es un factor que debe ser tomado en cuenta al intentar producir una mezcla de HPC. Los comités ACI 211 (2008) y ACI 234 (2006) recomiendan a los productores realizar ensayos periódicos de las propiedades del producto final, pues variaciones en la materia prima, o incluso el desgaste natural de la maquinaria utilizada en el proceso de producción, pueden tener un impacto considerable. Para aminorar este problema, se recomienda al productor mezclar la microsílce obtenida de varias fuentes (ACI 234, 2006). De detectarse cambios, el productor debe dar aviso a sus consumidores, de modo que éstos puedan evaluar el impacto en el hormigón que se está produciendo, de existir alguno.

Aditivos reductores de agua

En el desarrollo de hormigones de alta resistencia, uno de los parámetros más críticos de la mezcla es la relación w/c. La microsílíce produce un aumento en la demanda de agua de la mezcla debido a su alta área superficial, además de proporcionar viscosidad al hormigón, lo cual disminuye su trabajabilidad. Por estos motivos resulta necesaria la inclusión de un aditivo reductor de agua.

Actualmente los aditivos más populares para la obtención de HSC son los HRWR (High Range Water Reducer), que son reductores de agua de alto rango (ACI 211, 2008). Estos aditivos operan dispersando las partículas de cemento, lo que aumenta la trabajabilidad de la mezcla sin la necesidad de inclusión de agua (ACI 211, 2008). Son capaces de reducir el agua de la mezcla incluso en un porcentaje superior al 30% (Philips, 2005).

Guías para la obtención de una mezcla volumétrica de HSC

Existen varios lineamientos básicos para la obtención de un hormigón de alta resistencia. Al trabajar con microsílíce podemos mencionar algunos de estos:

- Realizar un control y selección adecuado de materiales (ACI 211, 2008).
- Mantener bajos valores de la relación w/c cercanos a 0.2 (ACI 211, 2008).
- Mantener la cantidad de microsílíce entre en 5 y 15% de los cementantes totales en masa (ACI 211, 2008).
- Trabajar con un tamaño nominal del agregado grueso igual a 1/2, siendo preferibles valores de 3/4 y 3/8 de pulgada.

Sin embargo, el proporcionar los distintos elementos de una forma adecuada y eficiente puede suponer un largo y costoso trabajo basado en ensayos de prueba y error. Al principio, el diseñador simplemente trabaja con un número demasiado alto de variables. Es por esto que el procedimiento a seguir recomendado por el comité ACI 211 (2008) consiste en iniciar por adoptar una predosificación inicial. Existen varias fuentes de predosificaciones iniciales como el código ACI 211.4R-08, el código ACI 234R-06, el “Silica Fume User’s Manual”, o cualquier investigación donde el autor reporte la dosificación y propiedades de una mezcla de hormigón. El proceso consiste simplemente en hallar una predosificación que haya producido un hormigón con las características deseadas y reproducirla con materiales disponibles en el mercado local.

Como ya se explicó, las características del hormigón de alta resistencia son altamente sensibles a algunas de las características de sus componentes. Con lo cual el reproducir una mezcla de hormigón con materiales locales típicamente requerirá de un proceso de modificación y reajuste de la predosificación inicial para obtener los resultados deseados.

Para una guía práctica del desarrollo de HSC el lector puede referirse al Capítulo 4 de esta tesis y tomar como ejemplo el desarrollo de la mezcla a ser empleada en el concurso internacional del ACI.

Propiedades de HSC

Como ya se mencionó anteriormente, las propiedades del hormigón van cambiando conforme se incrementa el valor de f'_c , y depende también de los materiales utilizados para su conformación. Por este motivo, para este trabajo investigativo la

información presentada se limita a describir el comportamiento a compresión, tensión, y cortante del HSC, pues se pueden hacer generalizaciones importantes aplicables a hormigones de alta resistencia y son los parámetros de mayor importancia al momento de evaluar la posible falla de la estructura a ser realizada. Información sobre comportamiento a largo plazo y otras propiedades importantes del HSC se pueden encontrar en el reporte ACI 363R-10 (ACI 363, 2010). Información sobre longitud de desarrollo se presenta en la revisión bibliográfica del refuerzo de FRP.

Curvas de esfuerzo-deformación

Típicas curvas de esfuerzo deformación para HSC de diferentes resistencias f'_c se pueden apreciar en la Figura 14.

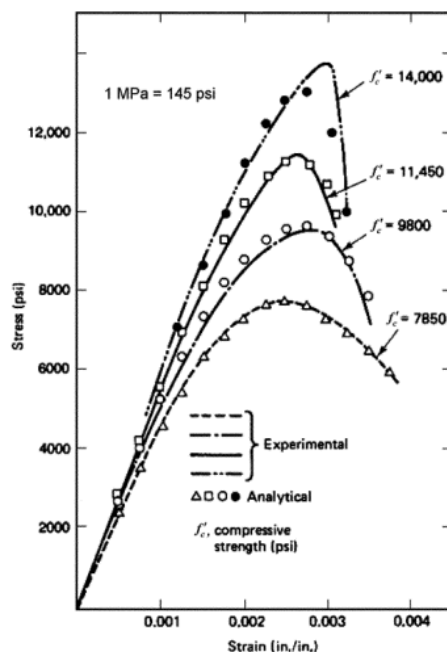


Figura 14. Curvas esfuerzo-deformación para HSC

Fuente: ACI 363 (2010). Report on high-strength concrete (ACI 363R-10). EE.UU.: American Concrete Institute.

Como se puede apreciar, incrementos en la resistencia hacen que la parte inicial de la curva tenga una pendiente más elevada y los cambios en la deformación máxima se dan muy lentamente. De donde se puede ver que a mayores resistencias también

debe ser mayor el módulo de elasticidad del hormigón. Sin embargo, cuando se trata de HSC ha habido un gran número de esfuerzos tratando de establecer una relación matemática entre estos dos parámetros pero ninguno parece ser totalmente satisfactorio hasta la fecha.

La investigación de Logan et al. (2009) compara un gran número de resultados experimentales con valores de los módulos de elasticidad predichos por las ecuaciones propuestas por los códigos ACI 318-02 y ACI 363R-92. Los resultados se resumen en la Figura 15.

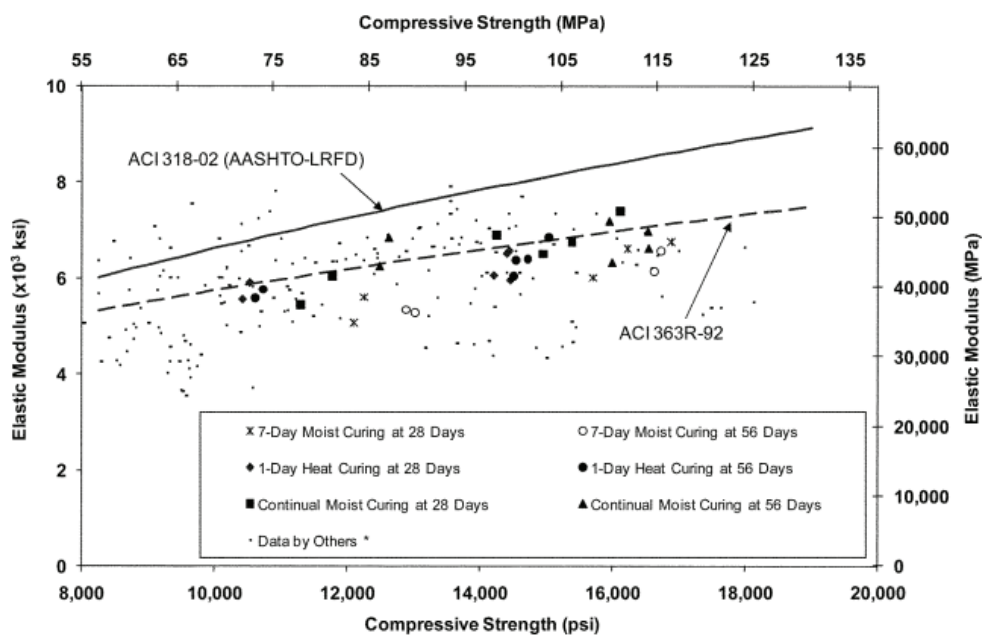


Figura 15. Valores de módulo de elasticidad vs f'_c para varias mezclas de HSC
Fuente: Logan et al. (2009). Short-term mechanical Properties of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*. Title no. 106-M46.

Cómo se puede apreciar la ecuación propuesta por el ACI 318 presentará típicamente sobreestimaciones significativas para hormigones de resistencias altas, con los desfases siendo mayores a medida que f'_c aumenta. La fórmula propuesta por el ACI 363 en 1992 produce predicciones más precisas y es presentada nuevamente por el comité ACI 363 (2010) y se muestra a continuación.

$$E_c = \left(3320 (f'_c)^{0.5} + 6900 \right) \left(\frac{w_c}{2320} \right)^{1.5} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Siendo w_c el peso específico del hormigón en kg/m^3 . El comité ACI 353 (2010) presenta otras 7 ecuaciones para el cálculo del valor de E_c para hormigones de alta resistencia. Estas ecuaciones no son presentadas aquí porque:

- La Ecuación 1 es la de uso más popular en cuanto a HSC habiendo sido ampliamente probada.
- Algunas de las nuevas ecuaciones mostradas incorporan índices que son difíciles de determinar y sus predicciones no parece variar de manera considerable con respecto a la Ecuación 1 de aplicación mucho más sencilla.
- Observando la dispersión de datos de la Figura 15 se considera difícil, si no imposible, que una ecuación pueda adaptarse de manera perfecta a los resultados experimentales.
- Se considera que la Ecuación 1 cumple con el objetivo de brindar una estimación rápida del valor de E_c . Para obtener resultados más exactos el ingeniero debería basarse en ensayos más que en una búsqueda de ecuaciones más precisas.

Por último, se menciona que un gran número de variables pueden afectar el módulo de elasticidad del material como el tipo de agregados utilizados y el porcentaje que representan en la dosificación final, el o los tipos de cementantes utilizados, los métodos y condiciones de curado, etc.

En otro punto, debido a que el aumento de $f'c$ lleva a un aumento del módulo de elasticidad, los hormigones de resistencias mayores necesitan también de esfuerzos de compresión mayores para alcanzar una cierta deformación unitaria. Esto explica en parte la baja variabilidad en la deformación máxima del hormigón a cambios del valor de $f'c$. Como se puede ver en la Figura 14, todas las curvas de esfuerzo-deformación presentadas indican una deformación máxima cercana a 0.003 aunque se presentan hormigones de resistencias finales muy distintas.

Resistencia a la tensión

Los principales parámetros para describir la resistencia a la tensión del hormigón son su módulo de rotura y su resistencia a la tensión indirecta. Esto se debe a que una determinación de la resistencia a la tensión real del hormigón presenta dificultades a la hora de realizar los experimentos (Nilson, 1999). Los ensayos del módulo de rotura consisten en calcular la resistencia a tensión del hormigón a partir de una viga simple cargada a flexión, lo que presenta una mayor facilidad pero lleva a sobreestimaciones de la resistencia real del hormigón a la tensión axial uniforme (Nilson, 1999). Los ensayos de resistencia a la tensión indirecta son más exactos y consisten en colocar un cilindro típico para ensayos a compresión del hormigón de manera horizontal y cargarlo, lo que produce un esfuerzo de tensión perpendicular al plano, de magnitud aproximadamente uniforme e igual a $2P/\pi dL$. Donde P es la carga aplicada en el cilindro, y d y L el diámetro y longitud del mismo (Nilson, 1999). Los resultados de estos ensayos muestran una dispersión considerablemente mayor a la de los ensayos de resistencia a la compresión (Nilson, 1999).

Sobre el módulo de rotura f_r , en comité ACI 363 (2010) presenta los resultados de investigaciones que indican que su valor debe estar entre 0.62 y $0.99\sqrt{f'_c}$ al trabajar en MPa (7.5 y $12\sqrt{f'_c}$ al trabajar en psi). La Figura 16 presenta los resultados de varios ensayos realizados y los compara con las predicciones de tres ecuaciones distintas.

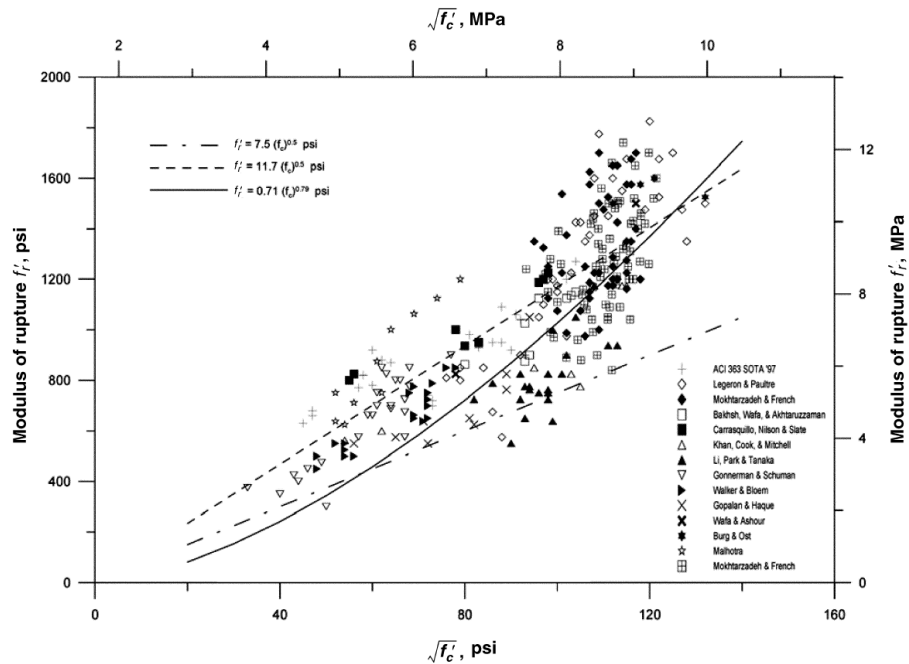


Figura 16. Valores f_r vs $\sqrt{f'_c}$ para varias mezclas de HSC.

Fuente: ACI 363 (2010). Report on high-strength concrete (ACI 363R-10). EE.UU.: American Concrete Institute.

Las tres ecuaciones propuestas en la figura son:

$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$f_r = 7.5\sqrt{f'_c} \text{ (psi)}$$

$$f_r = 0.94\sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

$$f_r = 11.7\sqrt{f'_c} \text{ (psi)}$$

$$f_r = 0.25f_c'^{0.79} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

$$f_r = 0.71f_c'^{0.79} \text{ (psi)}$$

Como se puede ver, la ecuación 2 tiende a subestimar los valores de f_r , siendo mayor su desviación a medida que aumenta el valor de $\sqrt{f_c'}$. Para un hormigón de alrededor de 90MPa de f_c' , que corresponde a un valor de 9.49 para $\sqrt{f_c'}$, la ecuación 3 es la que parece aproximarse mejor a los resultados experimentales y por tanto será la utilizada en esta tesis. Por último, la ecuación 4 se presenta como una para hormigones que han sido curados utilizando vapor de agua.

Sobre la resistencia a la tensión indirecta f_{sp} una investigación presentada por el comité ACI 363 (2010) muestra que su valor es de aproximadamente del 10% de f_c' para hormigones de resistencias bajas, pudiendo caer hasta el 5% cuando los valores de f_c' se acercan a los 90MPa. De entre las ecuaciones presentadas por el comité ACI 363 (2010) para estimar los valores de f_{sp} , la que parece ajustarse mejor a los resultados experimentales en hormigones de resistencias cercanas a los 90MPa es:

$$f_{sp} = 0.59\sqrt{f_c'} \text{ (MPa)} \quad (5)$$

$$f_{sp} = 7.4\sqrt{f_c'} \text{ (psi)}$$

Los resultados de varios ensayos para determinar a la tensión indirecta f_{sp} de mezclas de HSC de presentan en la Figura 17.

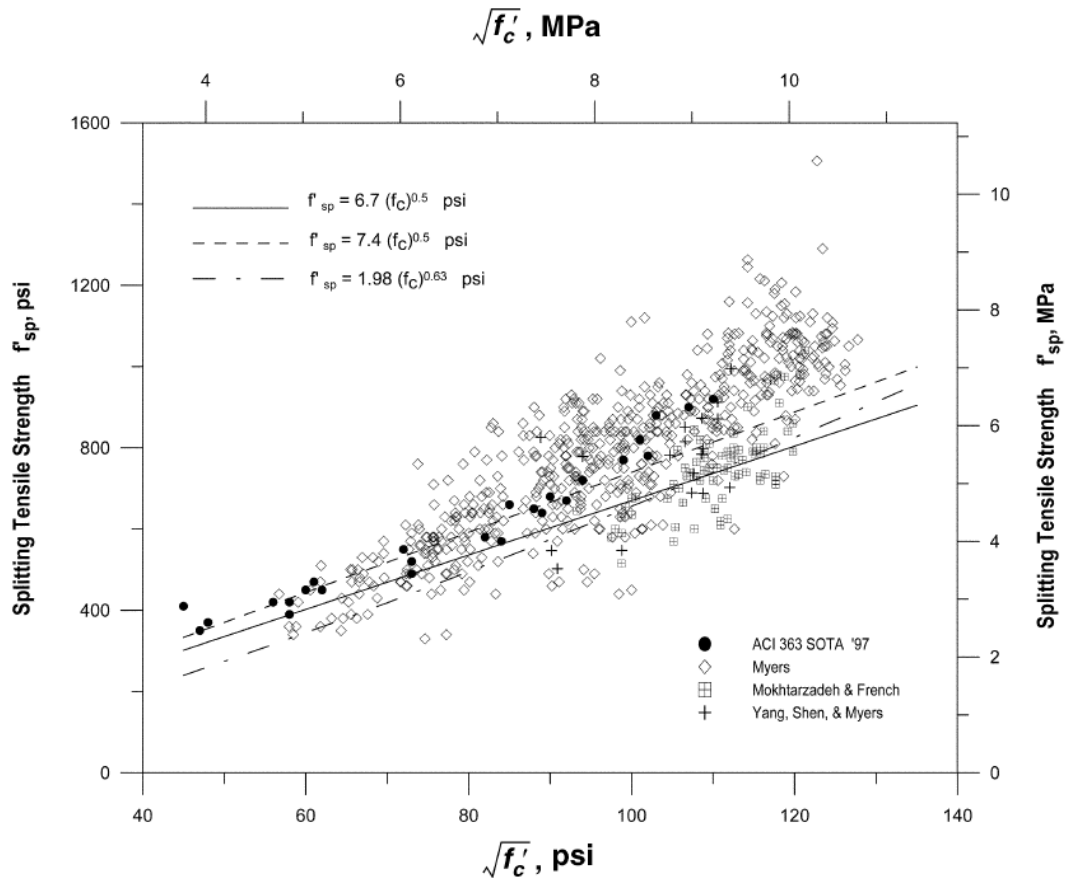


Figura 17. Valores f_{sp} vs $\sqrt{f'_c}$ para varias mezclas de HSC.

Fuente: ACI 363 (2010). Report on high-strength concrete (ACI 363R-10). EE.UU.: American Concrete Institute.

Como se puede ver la ecuación presentada en el ACI 318 muestra desviaciones importantes al aumentar el valor de f'_c , siendo mejores las predicciones presentadas por la ecuación 5.

Como se puede ver, al comparar las ecuaciones 3 y 5 es claro que los valores de f_r son mayores a los de f_{sp} . De acuerdo a Nilson (1999) esto se debe a que el valor de f_r se calcula con la asunción de que el hormigón es un material perfectamente elástico, lo que lleva a sobreestimaciones de la resistencia real a la tensión.

Resistencia al cortante

Acorde al comité ACI 363 (2010) las ecuaciones presentadas por código ACI 318 para calcular la resistencia del hormigón a esfuerzos de corte V_c tienen un carácter conservador al tratar con hormigones de resistencias normales. Para HSC el comité ACI 363 (2010) menciona que las ecuaciones propuestas disminuyen su nivel de conservadurismo pero siguen siendo aplicables. Sin embargo, para poder insertar valores de f'_c mayores a 69MPa se debe proporcionar un refuerzo transversal mínimo (ACI 363, 2010). De acuerdo a Nilson (1999), para hormigones de resistencias altas las ecuaciones del ACI 318 empiezan a sobreestimar la contribución del hormigón a la resistencia al corte. Sin embargo el comité ACI 363 (2010) no presenta ecuaciones alternas para tratar con HSC, y más bien recomienda colocar esfuerzo transversal suficiente para poder utilizar la totalidad del valor de f'_c en las ecuaciones.

Sin embargo, para la estructura a ser presentada en el concurso no se cuenta con refuerzo transversal alguno. Por este motivo se ha optado por calcular la resistencia a corte del hormigón con la ecuación:

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_w d (N) \quad (6)$$

Esta ecuación resulta ser la más conservadora de las presentadas por el ACI 318, en especial en zonas donde la relación cortante-momento aumenta (Nilson, 1999). Además se limitará el valor de f'_c a 69MPa ya que no se cuenta con esfuerzo transversal. Con esto se espera no sobreestimar la resistencia del hormigón a cortante.

Resumiendo los puntos antes presentados, a pesar de la variabilidad de los resultados y consideraciones especiales, se espera que el desarrollo de una mezcla de HSC lleve en conjunto a un aumento en las resistencia a compresión, tensión y cortante del hormigón. Esto a su vez debe llevar a la posibilidad de lograr una utilización más eficiente del refuerzo de FRP.

CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE LA MEZCLA DE HSC

Introducción

Como se explica en el análisis del concurso del ACI, la naturaleza del mismo hace que el camino lógico a seguir sea el desarrollo de una mezcla de hormigón de alta resistencia. Esto es debido a que los costos de los componentes de la mezcla de hormigón son mucho menores al de las varillas FRP que se deben utilizar. Incluso para una mezcla con un alto contenido de microsílíce se espera que el costo de la varilla represente más del 50% del costo total de la estructura.

Con esto en mente, la idea del diseño es lograr utilizar la alta capacidad a tensión de la varilla de la mejor manera posible. Aunque no se cree que se llegue a lograr desarrollar los esfuerzos últimos de la varilla, la idea es diseñar una mezcla de hormigón que pueda resistir diversos tipos de falla de la mejor manera posible. De lo investigado acerca del desarrollo de fuerzas de adherencia de las varillas FRP, se vio que aumentar la resistencia del hormigón no siempre suele tener un impacto positivo en ellas, pero al menos se desea llegar a que la falla por adherencia se dé por desprendimientos en la superficie de la varilla y no por falla de aplastamiento del hormigón.

Con esto en mente, la idea de desarrollar una mezcla de HSC es ayudar a que:

- La varilla desarrolle la mayor fuerza de adhesión posible para la longitud de desarrollo que dispone.
- Evitar o retrasar una falla por compresión del hormigón.

- Evitar o retrasar una falla por cortante del hormigón. Pues como ya se vio en el estudio de propiedades mecánicas del HSC, el conseguir valores mayores de $f'c$ tiene una relación estrecha con el aumento de la resistencia a cortante del material.
- Aunque se evitará el desarrollo de esfuerzos de tensión en el hormigón a base de la geometría de la estructura, se espera que la obtención de valores altos de $f'c$ se relacionen con una mejorada resistencia a la tensión del material.
- Aumentar la relación resistencia-costo de la estructura final a realizarse. Aunque el hormigón a desarrollarse tenga un costo mayor al de un hormigón común, se espera que una mejora en sus propiedades permita un uso más eficiente del refuerzo de FRP. Se espera que el aumento en la resistencia última de la estructura exceda ampliamente el aumento del costo final.

En este capítulo se detalla el proceso seguido para la obtención de la mezcla de hormigón utilizada. Se utilizará humo de sílice ASTM C1240 y un aditivo reductor de agua de alto rango de última generación, acorde a ASTM C494, cuidando de cerca la relación agua/cementante de la mezcla debido a los buenos resultados de estas prácticas reportados alrededor del mundo. Para desarrollar la mezcla se ha utilizado como base la guía preparada por el comité ACI 211 (2008) y las recomendaciones de Willie (2011).

Se discuten luego los procedimientos seguidos para el desarrollo de varias mezclas distintas, los resultados obtenidos, y los costos obtenidos para cada una de ellas en base a la tabla de costos entregada por el ACI. Se finalizará por analizar los resultados obtenidos para seleccionar la mezcla que sea considerada como la más apropiada.

Materiales seleccionados

Cada una de las mezclas preparadas utilizó como materiales una combinación específica de un tipo de cemento, agregados finos y gruesos, microsílíce, agua, y un aditivo reductor de agua de alto rango. La razón para las variaciones en el uso de materiales se debe a que cambios en sus composiciones químicas y propiedades físicas impactan las características finales del hormigón como su resistencia última, permeabilidad, trabajabilidad, resistencia a la erosión-abrasión, durabilidad, etc (ACI 211, 2008). El fin del trabajo experimental realizado es identificar y seleccionar la combinación de materiales más apropiada.

Cemento

El cemento utilizado es uno de los factores más influyentes en el desarrollo de hormigones de alto desempeño ACI 211 (2008). En esta investigación se ha prestado especial atención al efecto que los distintos tipos de cemento pueden tener en la demanda de agua de la mezcla, el comportamiento del aditivo reductor de agua de alto rango y la microsílíce, y la ganancia de resistencia del hormigón en función del tiempo.

Un punto al que se ha prestado atención, es el hecho de que uno de los mecanismos por los cuales la microsílíce aporta al aumento de resistencia en la mezcla es reaccionando con hidróxido de calcio (Ca(OH)_2 denotado también como CH) para producir silicato cálcico hidratado (CSH) y otros cementantes adicionales (ACI 234, 2006). De esta información se concluye que la composición química del cemento, que limita los productos de su hidratación, va a afectar la acción de la microsílíce en la mezcla. Con estas ideas en mente, se ha optado por utilizar, a manera de comparación, dos tipos de cementos distintos

disponibles en el Ecuador: el primero es un cemento portland tipo II (CP-II), de bajo contenido de C3A (Tabla 8) y el segundo, un cemento hidráulico de alta resistencia temprana (el productor no detalla la composición química del material) que cumple la norma ASTM C1157 de desempeño (CH-HE).

Tabla 8:
Composición química del cemento CP-II, contenido de C3A limitado al 7.2%

Composición Química	%
SiO ₂	21.9
Al ₂ O ₃	5.1
Fe ₂ O ₃	3.7
CaO	64.4
MgO	0.8
SO ₃	1.8
Na ₂ O	0.23
K ₂ O	0.19
TiO ₂	0.36
Total	100
Cal Libre	0.75
Residuo Insoluble	0.7
Álcalis Equivalente (%)	0.36
Potencial	%
C3A	7.2
C3S + 4.75 C3A	79.3

Microsílice

La composición química y propiedades físicas de la microsíllice dependen de un número alto de variables como el tipo de aleación del que se deriva, los métodos utilizados para su producción, densificación y recolección, y el estado general de la maquinaria utilizada durante todo el proceso (Holland, 2005). Los estudios consultados (Willie et al., 2011; ACI 234, 2006) no han podido establecer una relación clara entre diferentes tipos de microsíllice (todas acorde con ASTM C1240) y la calidad, resistencia y propiedades finales del hormigón producido. Por este motivo, en la presente investigación se ha decidido realizar todas las mezclas con un único tipo de microsíllice con el fin de no introducir una cantidad excesiva de variables que pueden escapar al control del productor y tener un

impacto desconocido. Se utilizó microsíllice con un contenido del 95% de SiO₂ y que cumple con la norma ASTM C1240 y cuyas propiedades se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9:
Composición química y propiedades de la microsíllice utilizada

SiO ₂ (%)(min.)	94.05
Fe ₂ O ₃ (%)	0.2
Al ₂ O ₃ (%)	0.2
CaO (%)	0.21
K ₂ O+ Na ₂ O (%)	2.00E-01
Humedad (%)	1.03
Perdida al Fuego	1.5
Densidad Aparente (kg/m ³)	500-700

Aditivo reductor de agua de alto rango (HRWR)

Se utilizaron dos aditivos distintos, ambos acorde a la norma ASTM 494 para aditivos reductores de agua de alto rango. El primero (ADTV1), denominado de última generación, que trabaja con policarboxilato como agente activo; estos aditivos son reconocidos hasta la fecha como los más apropiados para el desarrollo de hormigones de alto desempeño (Willie, 2011). El segundo (ADTV2) es un aditivo de segunda generación, utilizado para la producción de concreto reoplástico, utilizado por motivos de comparación. Ambos aditivos se encuentran en estado diluido, desconociéndose su concentración exacta, por lo que siguiendo el método de Willie et. al. (2011), se asumió un 40% de contenido sólido con el fin de tomar en cuenta la incorporación de agua adicional a la mezcla.

Agregados gruesos

Para las mezclas desarrolladas se utilizaron dos agregados provenientes de procesos de trituración y clasificación del material pétreo del Río Pilatón. El proceso permite obtener agregados de superficie angular y con baja presencia de partículas alargadas y

planas. El primero de estos agregados (AGR2) ha sido seleccionado con un tamaño nominal máximo de 3/4 y su granulometría se detalla en la Figura 18.

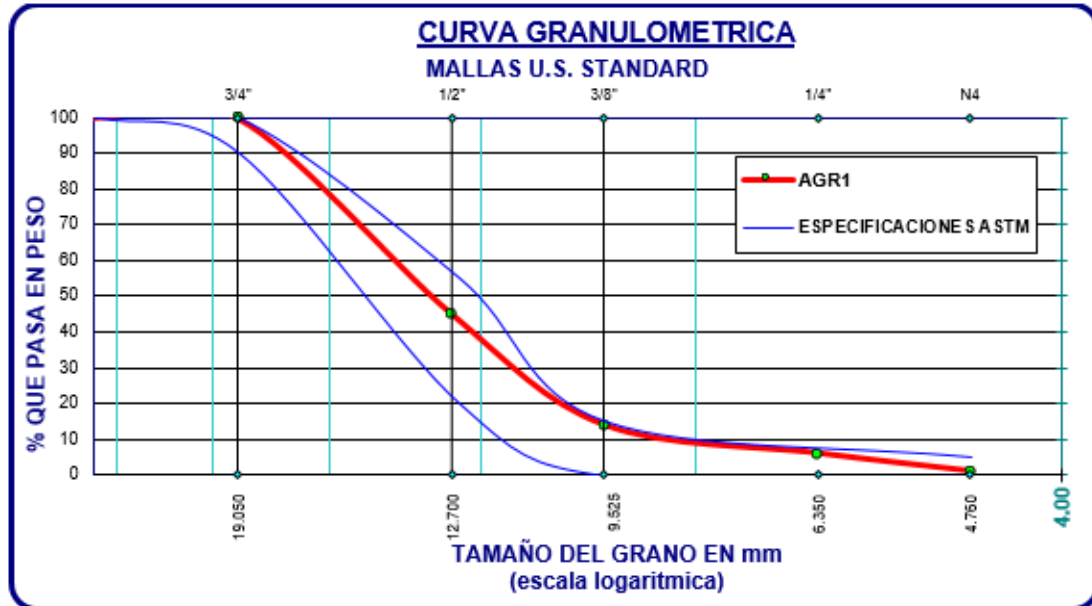


Figura 18: Granulometría del agregado grueso AGR1 (3/4").

El segundo agregado grueso se seleccionó con un tamaño nominal máximo de 3/8 (AGR2), y su granulometría se detalla en la Figura 19.

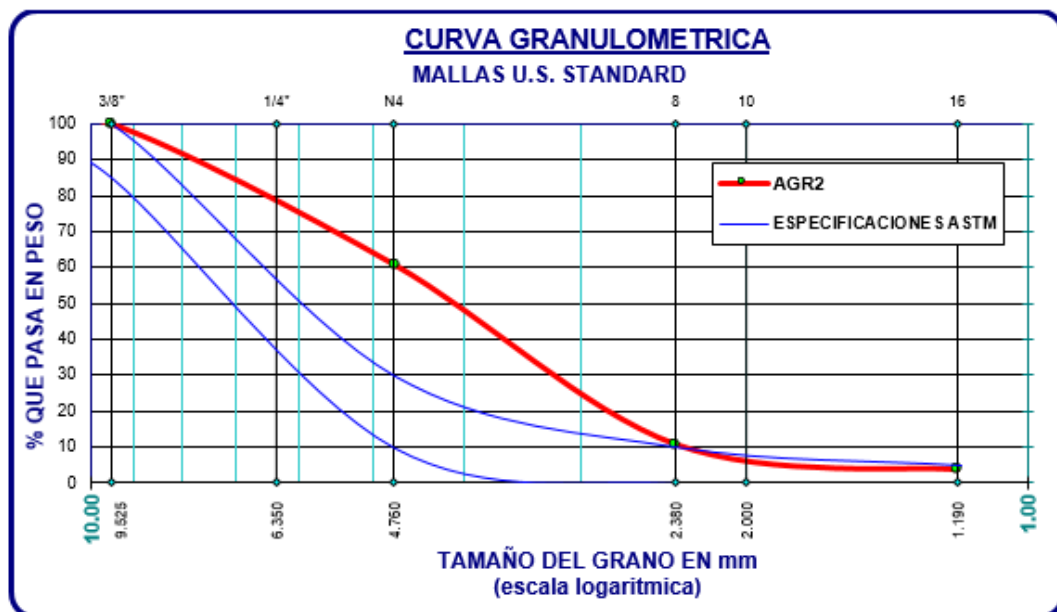


Figura 19: Granulometría del agregado grueso AGR2 (3/8").

Agregados finos

En el presente trabajo se utilizaron agregados finos (AFR1 y AFR2) provenientes de la misma fuente de producción del agregado grueso, cuyas granulometrías se muestran en las Figuras 20 y 21.

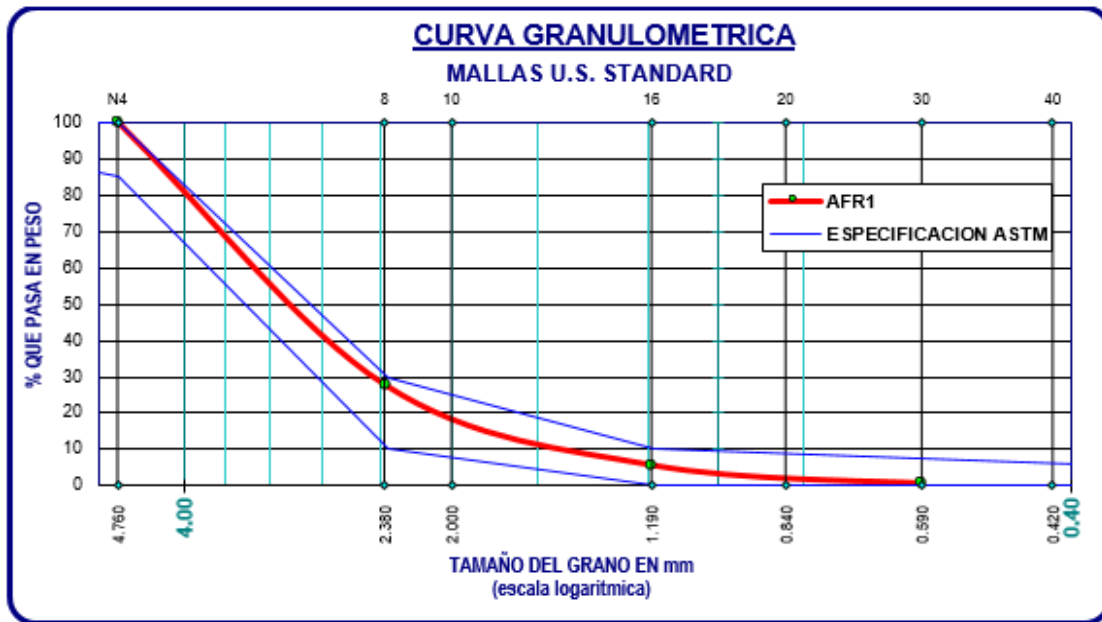


Figura 20: Granulometría del agregado fino (arena gruesa) AFR1 (#4).

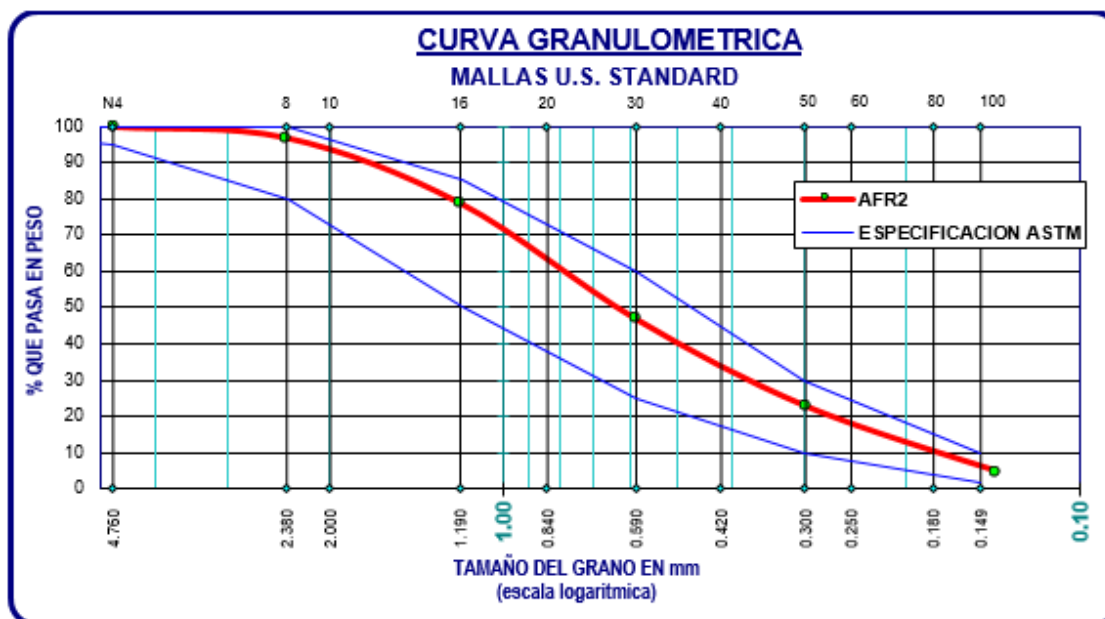


Figura 21: Granulometría del agregado fino (arena fina) AFR2.

Agua

Se utilizó agua proveniente del sistema de suministro de la ciudad de Quito, práctica aceptable por la buena calidad de la misma. De sospechar algún problema debido a la calidad del agua utilizada, ACI-211 recomienda referirse a la norma ASTM C1603 para agua utilizada en mezclas de hormigón (ACI 211, 2008).

Requerimientos

Las distintas mezclas desarrolladas serán evaluadas en dos requerimientos de desempeño: alta resistencia a la compresión y buena trabajabilidad de mezcla. El primer parámetro se ha tomado por la facilidad de realizar ensayos destructivos a compresión y la relación del valor de f'_c con mejoradas resistencias a corte y tensión, que no serán evaluadas. El segundo requerimiento es tomado para asegurar una buena fundición de la estructura.

El primer requerimiento es obtener resistencias a la compresión de alrededor de 90MPa, evaluadas mediante ensayos de resistencia a la compresión acorde a ASTM C31 y C39. El segundo requerimiento considerado fue la obtención de una trabajabilidad adecuada en la etapa fresca del hormigón evaluada mediante ensayos de revenimiento acorde a ASTM C143, con un mínimo de 5" de asentamiento. No se estableció un asentamiento máximo puesto que, aunque un asentamiento alto puede ser un indicador de posible segregación (Philips et al., 2005), la adición de microsílíce hace al hormigón resistente a este fenómeno (ACI 234, 2006; Holland, 2005) y niveles altos de asentamiento pueden deberse a efectos de los aditivos reductores de agua.

Dosificación inicial

Se tomaron en cuenta tres parámetros principales para la dosificación de las diferentes mezclas. La cantidad de cemento y las relaciones microsílíce/cemento (SF/C) y agua/cementante (w/c). El ACI recomienda mantener el contenido de microsílíce entre un 5 y 15% de la masa de cemento y relaciones w/c tan bajos como 0.20 (ACI 211, 2008). Para obtener una dosificación inicial se analizaron aquellas propuestas por los comités ACI consultados (ACI 211, 2008; ACI 234, 2006) y por Holland (2005). La predosificación 1 fue extraída del “Silica Fume User’s Manual” (Holland, 2005) y la predosificación 2 del comité ACI 211 (2008). Ambas se muestran en la Tabla 10 junto con los parámetros calculados.

Tabla 10:
Pre-dosificaciones iniciales adoptadas

No.	Fuente	Resistencia 28 días [MPa]	Cemento Portland [Kg/m ³]	Ceniza Volante [Kg/m ³]	Cemento de Escoria [Kg/m ³]	Microsílíce (SF) [Kg/m ³]	Tot. Cementantes (C) [Kg/m ³]	SF/C	W/C
1	Silica Fume User's Manual	83	406	0	169	47	622	7.56%	0.2
2	ACI211.4R-08	107	473.68	103.62	0	74.01	651.32	11.36%	0.2

Como se puede apreciar ambas predosificaciones predicen resistencias últimas de alrededor de los 90 MPa, que es la resistencia tomada como objetivo. Pese a que la predosificación 1 predice una resistencia menor, la cantidad en uso de cementantes adicionales también lo es, por lo que se espera que lleve a menores costos que podrían llevar a mejores relaciones resistencia/costo. Ambas predosificaciones utilizan cementantes adicionales que se escapan del alcance de esta investigación (cemento de escoria y cenizas volantes) por lo que el procedimiento seguido fue reemplazar estos cementantes por un peso similar del cemento utilizado en la mezcla (CP-II o CH-HE).

A partir de las predosificaciones iniciales presentadas, se establecieron 5 dosificaciones volumétricas empleando los materiales antes descritos, las cuales se detallan en la Tabla 11. Las mezclas 1 y 2 se diseñaron acorde a la predosificación 1 variando únicamente el tipo de cemento. Las mezclas 3, 4 y 5 siguen los lineamientos de la predosificación dos.

Tabla 11
Dosificaciones iniciales para producir 1 m³ de hormigón.

No.	CP-II [Kg]	HE-HE [Kg]	Microsílice [Kg]	ADTV1* [Kg]	ADTV2* [Kg]	AGR1' [Kg]	AGR2' [Kg]	AFR1' [Kg]	AFR2' [Kg]	Agua** [Kg]	SF/C	W/C ^{II}
1	585.19	0.00	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	188.45	0.07	0.23
2	0.00	585.19	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	188.45	0.07	0.23
3	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	186.35	0.10	0.22
4	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	186.35	0.10	0.22
5	0.00	634.42	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	186.35	0.10	0.22

* Valores corresponde al peso total de aditivo sustrayendo el porcentaje de agua

**Valores incluyen el aporte de agua por parte del aditivo

I Pesos secos

II Calculados tomando en cuenta los % de absorción de los agregados

Como se puede ver, las mezclas 3 y 4 poseen una dosificación igual de materiales. La única diferencia fue el procedimiento seguido para la preparación de las muestras, como se describe a continuación.

Preparación de muestras

Se debe tomar en cuenta que para establecer las dosificaciones de la Tabla 11 únicamente se tomó en cuenta las predosificaciones consultadas. Durante la preparación de las muestras se debe considerar además la trabajabilidad obtenida en la mezcla que puede llevar a ajustes en la cantidad de agua.

Para cada una de las dosificaciones propuestas se fabricaron muestras a escala, siguiendo dos procedimientos distintos, uno para las muestras 1-3 y otro para las muestras 4 y 5. La preparación de muestras incluye las correcciones necesarias en la cantidad de agua de mezcla, con la intención de obtener una trabajabilidad adecuada y una mezcla

homogénea de los componentes del hormigón. Para todas las mezclas se utilizó una mezcladora de 1/3 de saco que fue previamente limpiada y llevada a un estado de saturación de su superficie de modo que no extraiga o aporte agua a la mezcla.

Para las mezclas 1-3 se inició por verter el agua en la mezcladora, seguida del agregado grueso. Posteriormente se añadieron los cementantes y el aditivo, seguidos por los agregados finos. Se mezcló durante 4 minutos seguidos de 4 minutos de reposo y 4 minutos de mezclado finales. Durante el reposo se evaluó la apariencia física de la mezcla buscando que esta sea fluida y que los cementantes hayan formado una pasta que recubra a los agregados. Durante los últimos 4 minutos de mezclado se añadió agua en pequeñas cantidades de ser necesario con la intención de que el hormigón llegue a tener al aspecto deseado.

Para las mezclas 4 y 5 se inició de igual manera saturando la superficie de la mezcladora y colocando el agregado grueso. Posteriormente los cementantes junto con el agua y el aditivo fueron pre-mezclados aparte utilizando una batidora, la pasta formada fue luego añadida a la mezcladora seguida de los agregados finos. Este procedimiento pareció ser más efectivo en facilitar la reacción del cemento con el aditivo y permitir la obtención de una mezcla fluida. La mezcladora se mantuvo en funcionamiento durante 4 minutos, seguidos de 4 minutos de descanso y 4 minutos finales de mezclado durante los cuales se añadió agua de ser necesario, al igual que en las mezclas 1-3.

La variación en estos procedimientos es necesaria, conforme se gana experiencia en la manera cómo interactúan el cemento, la microsílíce y el aditivo reductor de alto rango.

Las variaciones en el agua de mezcla han sido tomadas en cuenta en la Tabla 12 que muestra las dosificaciones finales para cada una de las 5 mezclas realizadas.

Tabla 12:
Dosificaciones finales para producir 1 m³ de hormigón.

No.	CP-II [Kg]	HE-HE [Kg]	Microsílice [Kg]	ADTV1* [Kg]	ADTV2* [Kg]	AGR1 ^I [Kg]	AGR2 ^I [Kg]	AFR1 ^I [Kg]	AFR2 ^I [Kg]	Agua añadida [Kg]	Agua** [Kg]	SF/C	W/C ^{II}
1.00	585.19	0.00	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	5.49	193.94	0.07	24%
2.00	0.00	585.19	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	30.95	219.40	0.07	28%
3.00	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	3.02	189.37	0.10	23%
4.00	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	-10.07	176.28	0.10	21%
5.00	0.00	634.42	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	25.18	211.52	0.10	26%

* Valores corresponde al peso total de aditivo sustrayendo el porcentaje de agua

**Valores incluyen el aporte de agua por parte del aditivo y agua extra añadida durante la preparación de las muestras

I Pesos secos

II Calculados tomando en cuenta los % de absorción de los agregados

Finalizados los tiempos de mezclado de cada una de las dosificaciones, se procedió a realizar pruebas de revenimiento, acorde con la norma ASTM C143, en la cual todas las muestras mostraron asentamientos mayores a las 5 pulgadas fijadas como requerimiento mínimo (Figura 22). Finalmente, se procedió a la fabricación de muestras cilíndricas y a su posterior curado acorde con la norma ASTM C31. Las pruebas a compresión se realizaron a los 7 y 28 días siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C39.



Figura 22: Revenimiento típico en muestras de la mezcla 4.

Resultados

Las resistencias obtenidas en las pruebas a compresión a los 28 días se consideran resistencias características F_{cr} , conforme lo especifica el comité ACI 211 (2008). Siguiendo la misma especificación, la resistencia a la compresión a los 28 días f'_c , definida como requisito de aceptación del hormigón, es menor, basada en las variaciones estadísticas de los resultados de los ensayos. Los resultados de la resistencia f'_c se muestran en la Tabla 13. Como puede observarse, la mezcla 4 correspondiente al cemento portland tipo II dio como resultado una resistencia última a la compresión f'_c de 109.88 MPa calculada a partir de una resistencia media F_{cr} de 126.51 MPa según ACI 318 (2011). Algunas probetas de dicha mezcla alcanzaron incluso valores extremos de 138MPa (1407 kgf/cm²), siendo este el hormigón de mayor resistencia producido en el Ecuador del que se tenga registro hasta la fecha, con una gran trabajabilidad, medida en 9" de revenimiento en promedio.

Tabla 13:
Resistencia final a la compresión f'_c para ensayos a los 28 días.

Mezcla No.	Resistencia a la compresión f'_c [Mpa]
1	70.3287
2	76.8046
3	98.9001
4	109.9215
5	77.9067

Los costos de producción de las mezclas se obtuvieron en base a un análisis de precios unitarios. Se realizaron dos análisis diferentes con el fin de poder compararlos y presentar al lector información que le pueda ser de mayor utilidad. El primer análisis se realizó utilizando datos del mercado ecuatoriano. Los costos indicados incluyen el envío de los materiales y se muestran en la Tabla 14. Los costos por metro cúbico de producción y las relaciones resistencia/costo de cada una de las mezclas se indican en la Tabla 15, observándose nuevamente a la mezcla No. 4 con la mayor relación resistencia costo.

Tabla 14:
Precios unitarios del mercado ecuatoriano

Material	Precio	Unidad	Precio por 1 Kg [Dólares]
Cemento	7.8	Saco 50Kg	0.156
Microsílice	900	Ton	0.9
ADTV1	5.3	kg	5.3
ADTV2	2.45	Kg	2.45
Agregados	36	m3	1.32E-02

Tabla 15:
Relación resistencia/costo para precios del mercado ecuatoriano

Mezcla No.	Resistencia a la compresión f'c [MPa]	Precio por m ³ [Dólares]	Relación Resistencia/Costo
1	70.33	227.55	0.31
2	76.80	227.89	0.34
3	98.90	238.64	0.41
4	109.92	238.46	0.46
5	77.91	238.93	0.33

El segundo análisis es el que presenta la información relevante a la competencia, llevado a cabo con la hoja de costos entregada a los participantes que se presenta en el Anexo 3 y Anexo 4. Los resultados se detallan en la Tabla 16.

Tabla 16:
Relación resistencia/costo para precios del concurso ACI

Mezcla No.	Resistencia a la compresión f'c [MPa]	Precio por m ³ [Dólares]	Relación Resistencia/Costo
1	70.33	183.18	0.38
2	76.80	183.18	0.42
3	98.90	180.00	0.55
4	109.92	180.00	0.61
5	77.91	180.00	0.43

Como se puede ver al comparar las Tablas 15 y 16 el utilizar los precios unitarios propuestos por el ACI lleva a costos menores. Para los precios propuestos por el ACI, las mezclas 1 y 2 terminan por tener un costo mayor que las mezclas 3, 4 y 5 por la mayor cantidad de aditivo que deben utilizar, combinado con el alto precio puesto para los aditivos reductores de agua de alto rango que no utilizan policarboxilato como agente

activo. La menor eficiencia del aditivo termina por encarecer la mezcla de manera excesiva.

En otro punto, la mezcla 4 lleva a la relación resistencia/costo mayor y también brinda el valor mayor de f'_c por lo que será escogida como la mezcla para realizar la estructura. También es importante notar que, como se puede ver en la hoja de costos anexada, el hormigón representa en total un costo de 1.13\$ mientras que la varilla de FRP tiene un costo de 1.75\$. Allí podemos ver que, representando la varilla el 60% del costo total de la estructura, vale la pena desarrollar una mezcla de hormigón que permita utilizarla de la manera más eficientemente posible.

Discusión

En general el procedimiento seguido para obtener las predosificaciones ha demostrado ser efectivo. El comparar las resistencias esperadas de la Tabla 10 con las resistencias finales de la Tabla 13, parece indicar que el sustituir los cementantes adicionales propuestos por las predosificaciones 1 y 2 (cemento de escoria y ceniza volante) por los cementos CH-HE y CP-II, acarrea una disminución de la resistencia final esperada pero no impide el desarrollo de hormigones de alta resistencia. Sin embargo, la mezcla 4 ha logrado superar la resistencia esperada por la predosificación 2, sin la incorporación de ceniza volante (probablemente debido al método de mezclado más efectivo y una actitud conservadora de las fuentes consultadas y descritas en la Tabla 10, al especificar las resistencias esperadas). Los resultados muestran que el cemento CH-HE alcanzó una resistencia mayor al cemento CP-II al utilizar como base la predosificación 1. Sin embargo al utilizar los parámetros de la predosificación 2 el cemento CP-II es el más apropiado.

Observando los datos de corrección de agua se puede notar que el cemento CH-HE produce consistentemente una demanda de agua mayor al cemento CP-II, y por tanto dificulta la consecución de relaciones w/c bajas. El procedimiento utilizado para mezclar los materiales también demostró tener un impacto considerable en la demanda de agua. Comparando las mezclas 3 y 4 puede observarse, que el cambio total en el agua requerida fue de 260 kg y llevó a un cambio en la relación w/c de 0.23 a 0.21, factor que explica un aumento en la resistencia final de casi 11 MPa.

Por otro lado, todos los tipos de agregados utilizados demostraron ser aptos para el desarrollo de hormigones de alta resistencia. La efectividad de su granulometría y el buen empaquetamiento obtenido se puede observar en la Figura 23 que muestra la superficie de fallo de uno de los cilindros de prueba.



Figura 23: Superficie de fallo de cilindro de prueba a compresión (mezcla 4).

CAPÍTULO 5: DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA

Introducción

Hasta el momento se han revisado las propiedades y comportamiento de los materiales a ser utilizados en la conformación de estructura. En este capítulo se toma en cuenta dicha información junto con las reglas y bases del concurso del ACI para concebir la estructura a ser fabricada.

Se iniciará por analizar los puntos principales de la competencia, tales como la configuración de apoyos y carga a la que la estructura será sometida, limitaciones y penalizaciones para el peso y la forma, etc. La totalidad de las reglas e información entregada a los participantes se encuentran adjunta a esta tesis como anexos (Anexo 1).

Posteriormente se concebirá una geometría previa, se analizarán las propiedades de las varillas FRP entregadas para seleccionar las más adecuadas, y se fabricarán especímenes de prueba con el fin de realizar observaciones previas a la fabricación de las dos estructuras finales destinadas a participar en el concurso del ACI.

Reglas y bases del concurso

El primer punto a tomar en cuenta por los competidores es la configuración de apoyos y cargas a los que serán sometidas las estructuras participantes. Dicha configuración se muestra en la Figura 24.

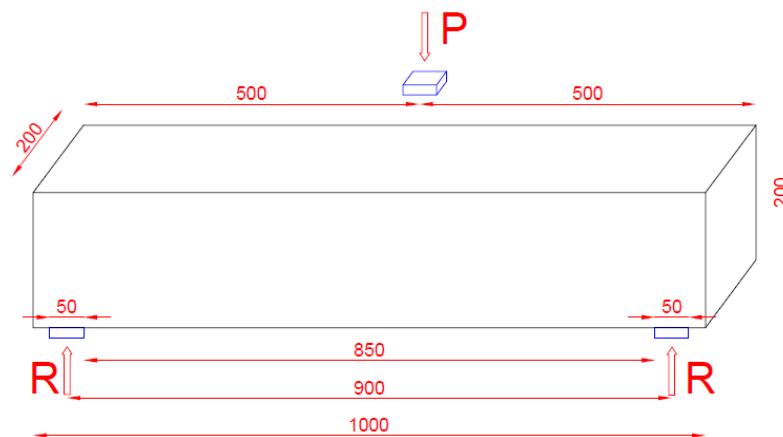


Figura 24: Configuración de soportes y carga para la estructura.

Se debe notar que la estructura no debe tener una forma rectangular y puede adoptar cualquier forma que entre en la caja de 1000x200x200mm que se muestra en la Figura 24. La única condición que debe cumplir la estructura es la de tener una luz entre 950 y 1000mm debido a la separación de los apoyos. Por último, tanto las placas de apoyo como la placa que transfiere la carga son de 50x50mm, y se encuentran alineadas.

Sin embargo, existen penalizaciones para estructuras con ciertas geometrías:

- Si la sección transversal de la estructura no es rectangular se debe multiplicar el costo total de la mezcla de hormigón por un factor de 1.1.
- Si sección transversal varía a lo largo de la luz se debe multiplicar el costo total de la mezcla de hormigón por 1.1.

A más de esto se debe tomar en cuenta que el parámetro a ser evaluado es la carga máxima resistida por la estructura dividida para el costo total de la misma, con lo cual el objetivo es optimizar el uso de los materiales. Las estructuras serán sometidas a una carga máxima de 67kN, con lo cual puede no ser conveniente diseñar una estructura de resistencia mayor ya que toda la capacidad extra de la estructura puede significar un aumento del costo.

Un último punto a tomar en cuenta es el costo de los componentes de la estructura. Las reglas del concurso obligan a utilizar al menos uno de los refuerzos de FRP entregados a los participantes y se puede utilizar cualquier combinación de estos. Sin embargo el costo de cada elemento utilizado debe ser reportado por unidad, lo que significa que aunque no se utilice el total de la varilla en estructura se debe reportar el costo completo. Las fichas técnicas de cada uno de los compuestos de FRP entregados se encuentran en el Anexo 2 de esta tesis.

Estas son las consideraciones principales que se tomaron en cuenta para desarrollar la estructura. El total de las reglas y bases del concurso se encuentran en el Anexo 1 de esta tesis.

Geometría

La idea principal de la geometría es utilizar de la manera más eficiente los materiales disponibles. Los compuestos de FRP tienen un costo elevado comparado a los componentes de la mezcla de hormigón, siendo de 1.75\$ por cada varilla estándar, 2.44\$ por cada varilla de alta resistencia y de 2.03\$ para la grilla de fibra de carbono.

Un análisis de estructuras ingresadas en competencias previas permitió estimar el costo del hormigón a ser utilizado en 1.25\$ con lo cual cada varilla o compuesto de FRP utilizado representa un aumento de más del 100% del costo del hormigón. Debido a esta consideración se decidió utilizar únicamente una varilla de FRP pues no se cree que el implementar una segunda varilla lleve a duplicar la resistencia final de la estructura. Además las altas resistencias de las varillas hacen difícil imaginar una configuración que

logre producir una falla del refuerzo y que, por tanto, amerite implementar una mayor cantidad del mismo.

La geometría previa fue desarrollada con la idea de utilizar la menor cantidad de hormigón posible, permitiendo que este trabaje principalmente en compresión, siendo los esfuerzos de tensión transferidos al refuerzo. Esta geometría se muestra en la Figura 25.

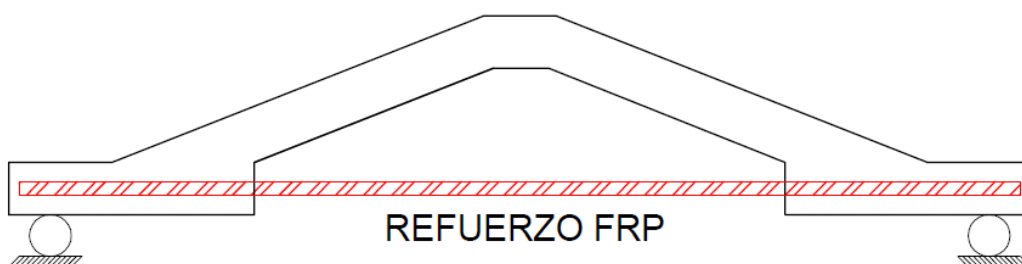


Figura 25: Geometría previa para la estructura.

Como se puede observar, la geometría trata de formar un triángulo. Esto permite analizarla, a manera de prediseño, como una cercha donde sus elementos deben estar en compresión o tensión pura. Haciendo esta simplificación tenemos una estructura como la que se ve en la Figura 26.

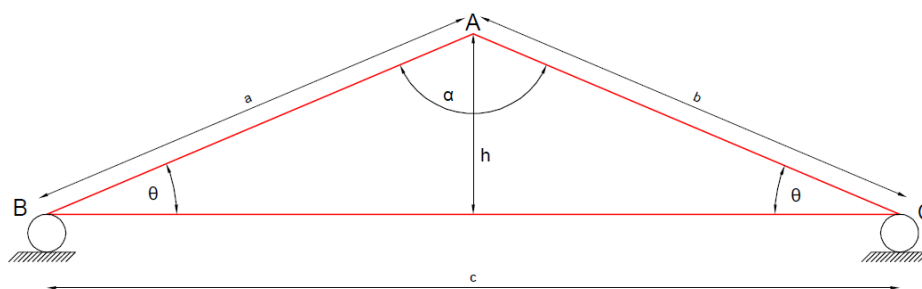


Figura 26: Estructura representada como una cercha.

Siendo una estructura simétrica, se pueden deducir las reacciones en los nodos B y C como $P/2$ en ambos casos, siendo P la carga total aplicada en A. Un análisis de los nodos A y B (Figura 27 y Figura 28) permiten hallar los valores de las fuerzas internas de los elementos en función del ángulo θ .

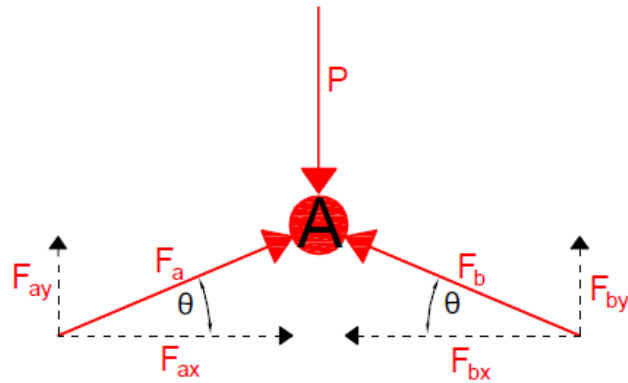


Figura 27: Fuerzas actuantes en el Nodo A.

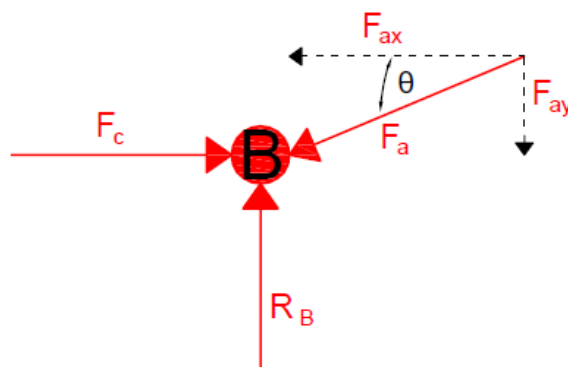


Figura 28: Fuerzas actuantes en el Nodo B.

Por simetría tenemos que:

$$F_{ax} = -F_{bx}$$

$$F_{ay} = F_{by}$$

Por equilibrio de fuerzas se puede ver que los elementos a y b deben trabajar a compresión y que la magnitud de esta fuerza debe ser:

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{ay} + F_{by} = P$$

$$F_{ay} = F_{by} = -\frac{P}{2}$$

Para el siguiente paso se utiliza trigonometría sencilla:

$$\sin \theta = \frac{F_{ay}}{F_a} = \frac{F_{by}}{F_b}$$

$$F_a = F_b = -\frac{\left(\frac{P}{2}\right)}{\sin \theta}$$

$$\cos \theta = \frac{F_{ax}}{F_a} = \frac{F_{bx}}{F_b}$$

$$F_{ax} = F_{bx} = -\frac{\left(\frac{P}{2}\right)}{\tan \theta}$$

Analizando en nodo B, con configuración igual al nodo C, se puede observar que el elemento c debe trabajar a tensión y la magnitud de esta fuerza debe ser:

$$\sum F_y = 0$$

$$F_c = -F_{ax}$$

$$F_c = \frac{\left(\frac{P}{2}\right)}{\tan \theta}$$

Hablando únicamente de magnitudes tenemos que la fuerza en los elementos a y b debe ser de $\frac{\left(\frac{P}{2}\right)}{\sin \theta}$ en compresión y para el elemento c de $\frac{\left(\frac{P}{2}\right)}{\tan \theta}$ en tensión. Las conclusiones que se pueden extraer de este análisis son:

- La geometría es efectiva en hacer al hormigón trabajar principalmente a compresión y el refuerzo a tensión.

- Mientras mayor sea el ángulo Θ las magnitudes de las fuerzas de compresión y tensión en los elementos disminuye. Para aumentar este ángulo se puede incrementar la dimensión “h” de la cercha (ver Figura 26) por lo que lo ideal sería dar a la estructura final una altura de 200mm que es la máxima permitida. Para evitar problemas de sobredimensionamiento se dará a “h” un valor de 190mm ya que pequeños factores en la fundición y creación de los encofrados podrían aumentar esta dimensión.

Con esto se pudo dar valores a los lados y ángulos de la cercha formada en la Figura 26. Se forman dos triángulos rectángulos como se ve en la Figura 29.

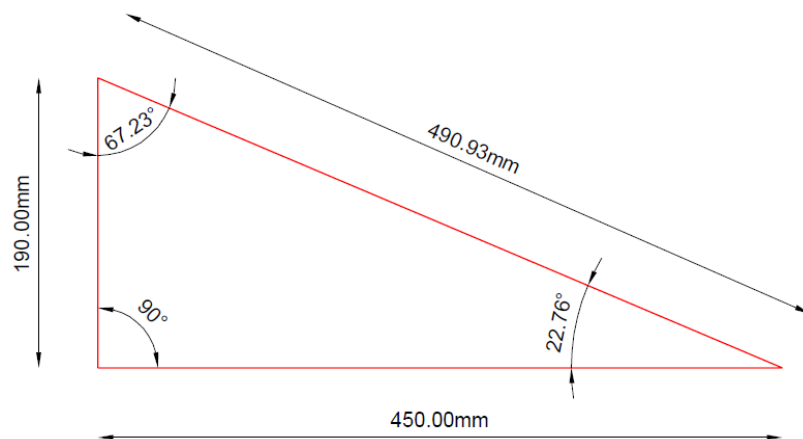


Figura 29: Dimensiones finales para la estructura tipo cercha.

Utilizando trigonometría se tiene:

$$a = b = \sqrt{450^2 + 190^2} = 490.93mm$$

$$\sin \theta = \frac{190}{490.93}$$

$$\theta = 22.76^\circ$$

Con el valor de Θ se puede calcular cuál sería el valor máximo esperado en el refuerzo (elemento c) y en el hormigón (elementos a y b) si se llega a la carga máxima de 67kN:

$$F_a = F_b = \frac{\left(\frac{P}{2}\right)}{\sin \theta} = \frac{\left(\frac{67}{2}\right)}{\sin 22.76^\circ} = 86.58kN$$

$$F_c = \frac{\left(\frac{P}{2}\right)}{\tan \theta} = \frac{\left(\frac{67}{2}\right)}{\tan 22.76^\circ} = 79.83kN$$

La varilla FRP de menor capacidad es la “Marshall Industries C-Bar” que tiene una resistencia de 91.85kN con lo cual vemos que no hay sentido en utilizar más de una varilla si es que las condiciones mismas de la competencia no permiten esforzarla a su máxima capacidad. Otra conclusión de este resultado es que no hay necesidad de optar por una varilla de alta resistencia, ya que las varillas de estándar proporcionan una capacidad suficiente y tienen un costo mucho menor.

La selección de la varilla se realizará por la adherencia que esta pueda desarrollar con el hormigón, pues pasando del modelo tipo cercha a la estructura real vemos que la interfaz entre el hormigón y la varilla debe ser capaz de transmitir los esfuerzos del hormigón al refuerzo.

En otro punto, el esfuerzo de compresión máximo encontrado en el hormigón es de 86.58kN. La mezcla de hormigón desarrollada brinda una capacidad de 109.92MPa, de donde se puede estimar el área de la sección transversal que la estructura debería poseer:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{F}{\sigma}$$

$$A = \frac{86580 [N]}{109920000 \left[\frac{N}{m^2} \right]} = 0.00079m^2 = 787.66mm^2$$

Debido a este resultado se decidió limitar el ancho de la estructura a 50mm que es el ancho de los soportes y de la placa de aplicación de la fuerza de modo que los esfuerzos que se generan en las superficies de contacto sean menores. Basándose en el resultado anterior la altura de la sección transversal podría ser de tan solo 15mm, sin embargo se tomó una altura de 50mm porque el análisis anterior no considera efectos de corte y posibles concentraciones de esfuerzos y apariciones de momentos. Así, de este análisis nace la concepción de la estructura tipo viga que se muestra en la Figura 30.

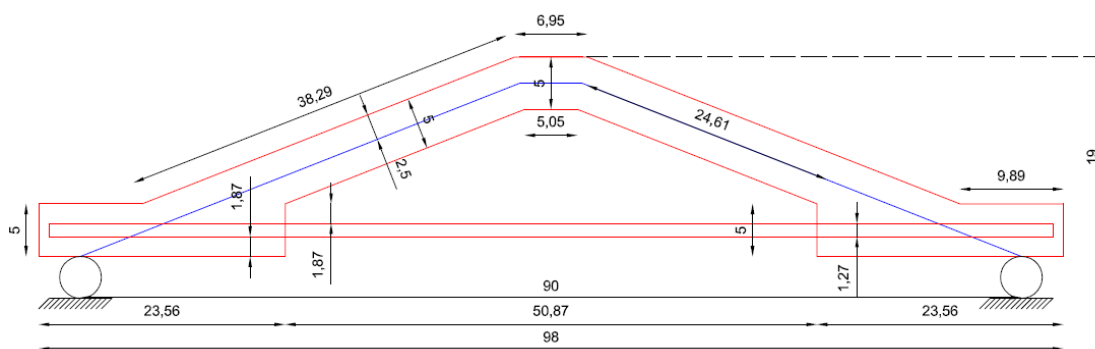


Figura 30: Esquema de la geometría escogida para la estructura tipo viga (dimensiones en cm).

El último paso a seguir fue escoger las varillas de FRP a ser utilizadas como refuerzo en las estructuras. Como el análisis previo indica que el refuerzo trabajará a esfuerzos menores a su resistencia a la tensión, se eligieron las varillas tomando como único criterio la adherencia que estas logren producir con el hormigón. Sin embargo, por cuestiones de tiempo y disponibilidad de equipos, resultó imposible realizar pruebas de adherencia para las varillas. Además, como se puede ver en las especificaciones técnicas de las varillas, estas

no dan un parámetro comparable de la adherencia de las mismas. Por tanto se optó por utilizar como refuerzo la varilla “Marshall Industries C-Bar” para la estructura del equipo USFQ 1 y la varilla “Hughes Brothers Aslan” para la estructura USFQ 2. Esta selección se realizó para probar dos mecanismos de adherencia distintos. La varilla “Marshall Industries C-Bar” presenta una superficie con ondulaciones y liza, mientras que la varilla “Hughes Brothers Aslan” tiene su superficie rugosa cubierta con partículas como se muestra en la Figura 31 y la Figura 32.



Figura 31: Varilla “Marshall Industries C-Bar”.



Figura 32: Varilla “Hughes Brothers Aslan”.

Preparación de especímenes

Para la competencia se prepararon dos estructuras con geometría igual, variando únicamente la varilla de FRP a ser utilizada como se indicó en la sección anterior. Para conseguir la geometría deseada se utilizaron encofrados de madera, masillados en las esquinas y cubiertos con cera para evitar la pérdida y absorción de agua. Dichos encofrados se muestran en la Figura 33.



Figura 33: Encofrado para estructuras finales.

Posterior a su fundición las vigas fueron cubiertas con plástico para conservar la humedad. Una vez fraguado el hormigón las vigas fueron sumergidas totalmente en agua para iniciar su proceso de curado. El producto final se muestra en la Figura 34.

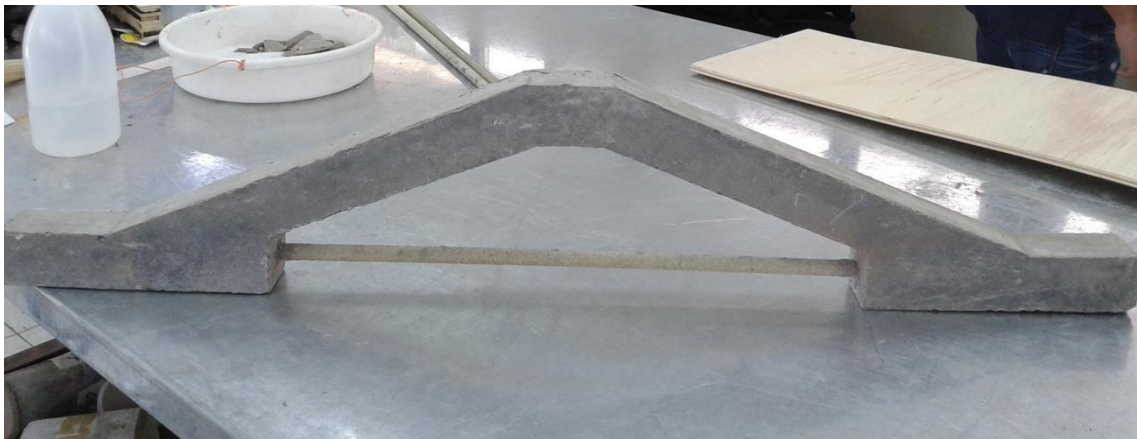


Figura 34: Imagen de estructuras finales.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y POSIBLES MEJORAS.

Introducción

Durante la competencia del ACI el proceso de diseño que se expone en el capítulo anterior demostró ser incompleto y no apto para dimensionar la estructura de una manera adecuada.

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos y se presenta un análisis tridimensional, más completo, con la intención de identificar los motivos de la falla prematura y proponer posibles mejoras para una competencia futura.

Resultados

Durante la competencia ambas vigas fallaron a una carga mucho menor a los 67kN para los que fueron diseñadas. La estructura del equipo USFQ1 falló con una carga de 27kN y la estructura del equipo USFQ2 presentó la falla a los 22kN.

Pese a que la carga final resultó ser mucho menor a la carga máxima de 67kN se logró obtener el quinto y sexto lugar en la competencia respectivamente ya que las relaciones resistencia-costo alcanzadas fueron de 9.36 y 7.62 respectivamente.

Un análisis visual de las estructuras posterior a la falla indica problemas de adherencia entre el hormigón y las varillas de FRP utilizadas, con el recubrimiento desprendiéndose y fallando de manera explosiva. Una inspección visual de las varillas luego de producida la falla, muestra un nivel moderado de desgaste en la superficie de las mismas como se puede ver en la Figura 35 y Figura 36.



Figura 35: Superficie de la varilla “Marshall Industries C-Bar” posterior a la falla.



Figura 36: Superficie de la varilla “Hughes Brothers Aslan” posterior a la falla.

Como se puede apreciar en la Figura 35, el refuerzo “Marshall Industries C-Bar” presenta el desgaste de algunas de sus ondulaciones superficiales, aunque se pueden encontrar también zonas prácticamente intactas. La Figura 36 muestra el estado de la varilla “Hughes Brothers Aslan” posterior a la falla, el hormigón adherido a la varilla se debe a la adhesión química que se produjo entre ambos. Al igual que el refuerzo “Marshall Industries C-Bar”, esta varilla presenta ciertos daños superficiales aunque no apuntan a que la estructura haya fallado por desgarramiento superficial del refuerzo.

Pese a que la estructura presentó problemas de adherencia durante el ensayo, la causa más probable de la falla fue el cortante desarrollado en los brazos de la estructura, dando como resultado la fractura que se muestra en la Figura 37.



Figura 37: Falla a cortante.

Con esto en mente se procede a proponer un análisis más completo de la estructura que incluya esfuerzos de cortante, con el fin de explicar los motivos de la falla y proponer un dimensionamiento más adecuado.

Análisis tridimensional

En el capítulo anterior se simplificó la estructura con la intención de poder analizarla como una cercha. Por los malos resultados obtenidos se procede aquí a realizar un modelo computacional de la estructura utilizando el software SAP2000. La parte de hormigón fue modelada como un sólido, ingresando las dimensiones exactas de las estructuras participantes. La varilla de refuerzo se ingresó como un elemento tipo “Frame”. El resultado se muestra en a Figura 38.



Figura 38: Modelo computacional de la estructura tipo viga.

Las propiedades de cada una de las varillas ingresadas al modelo computacional se muestran en la Figura 39 y la Figura 40.

Material Property Data

Material Name FRP C-Bar	Material Type Rebar	Symmetry Type Uniaxial
Modulus of Elasticity E1 4.283E+09	Weight and Mass Weight per Unit Volume 611.11 Mass per Unit Volume 62.35	Units Kgf. m. C
Poisson's Ratio U12 0.3	Other Properties for Rebar Materials Minimum Yield Stress, Fy 73929400 Minimum Tensile Stress, Fu 73929400 Expected Yield Stress, Fye 81577300 Expected Tensile Stress, Fue 81577300	
Coeff of Thermal Expansion A1 1.170E-05	Advanced Material Property Data Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties... Thermal Properties...	
Shear Modulus G12 7.842E+09		
OK Cancel		

Figura 39: Propiedades de la varilla "Marshall Industries C-Bar".

Material Property Data

Material Name FRP ASLAN	Material Type Rebar	Symmetry Type Uniaxial
Modulus of Elasticity E1 4.691E+09	Weight and Mass Weight per Unit Volume 2232.54 Mass per Unit Volume 227.81	Units Kgf. m. C
Poisson's Ratio U12 0.3	Other Properties for Rebar Materials Minimum Yield Stress, Fy 77294500 Minimum Tensile Stress, Fu 77294500 Expected Yield Stress, Fye 85290100 Expected Tensile Stress, Fue 85290100	
Coeff of Thermal Expansion A1 1.170E-05	Advanced Material Property Data Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties... Thermal Properties...	
Shear Modulus G12 7.842E+09		
OK Cancel		

Figura 40: Propiedades de la varilla "Hughes Brothers Aslan".

Como se puede observar en ambas figuras el esfuerzo de fluencia se iguala al esfuerzo último para indicar que no existe zona de fluencia en las varillas. El coeficiente de

expansión térmica no ha sido modificado pues no se realizarán evaluaciones de esfuerzos por cambios de temperatura. Para tomar en cuenta la anisotropía de la varilla y su incapacidad de resistir esfuerzos perpendiculares al eje de la misma, se ha establecido el tipo de simetría como uniaxial. A diferencia de las varillas “Marshall Industries C-Bar”, las varillas “Hughes Brothers Aslan” sólo indican una resistencia mínima garantizada y no muestran una resistencia promedio. Para poder colocar los valores de F_y y F_u en las varillas “Hughes Brothers Aslan” se utilizó un factor de 0.90625 que relaciona los valores mínimos con los esperados en las varillas “Marshall Industries C-Bar”.

Posteriormente se procedió a ingresar las propiedades del hormigón de alta resistencia. Estas propiedades se muestran en la Figura 41.

Material Property Data

Material Name HSC	Material Type Concrete	Symmetry Type Isotropic
Modulus of Elasticity E 4.580E+09	Weight and Mass Weight per Unit Volume 23892.498 Mass per Unit Volume 2438.01	Units Kgf, m, C
Poisson's Ratio U 0.3	Other Properties for Concrete Materials Specified Concrete Compressive Strength, f'c 11208718 <input type="checkbox"/> Lightweight Concrete Shear Strength Reduction Factor	
Coeff of Thermal Expansion A 1.170E-05	Advanced Material Property Data Nonlinear Material Data... Material Damping Properties... Time Dependent Properties... Thermal Properties...	
Shear Modulus G 1.762E+09	OK Cancel	

Figura 41: Propiedades del hormigón de alta resistencia.

Resultados para la estructura USFQ 1

Para analizar el estado de la estructura USFQ 1 al momento de la falla se procedió a asignar las propiedades de la varilla “Marshall Industries C-Bar” al refuerzo y colocar una

carga igual a 27kN. Primero se analizaron los esfuerzos desarrollados en la varilla, los resultados se muestran en la Figura 42.

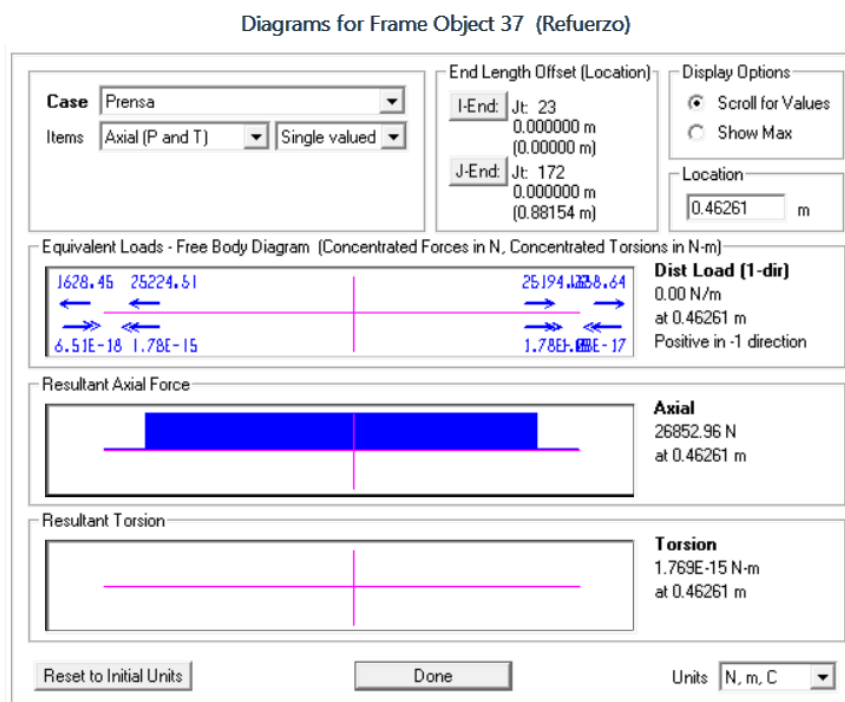


Figura 42: Esfuerzos en la varilla "Marshall Industries C-Bar" al momento de la falla.

Cómo se puede ver, la varilla está sometida a un esfuerzo de tensión cercano a los 26.9kN. Este esfuerzo es mucho menor a la capacidad de la varilla pero provoca el desarrollo de esfuerzos de corte significativos entre el hormigón y la varilla, lo que lleva a un desgaste de la superficie de la misma.

El análisis de cuerpo sólido de hormigón se realiza mediante elementos finitos formándose cuerpos de 8 esquinas como se muestra en la Figura 43.

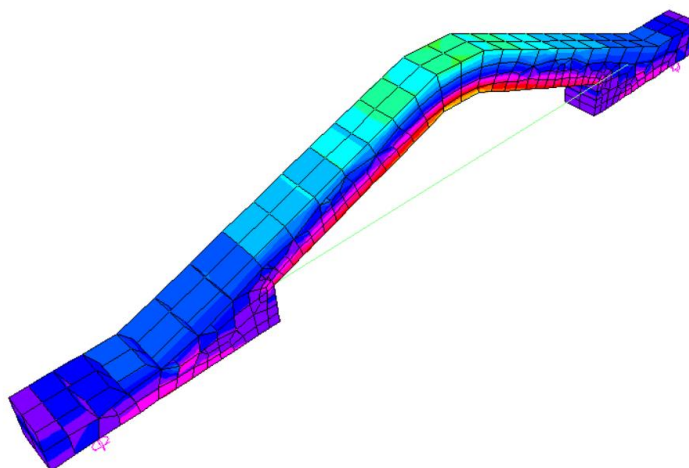



Figura 43: Esfuerzos en el cuerpo de hormigón de la estructura USFQ 1.

Utilizando la opción “Section Cut” del menú “Draw” se puede definir una superficie de corte de manera que el programa indique los esfuerzos que se desarrollan en una sección transversal del sólido. Los resultados críticos para los brazos de la estructura se muestran en la Figura 44.

 Section Cut Stresses & Forces

Section Cutting Line

	X	Y	Z
Start Point	2533.5795	0.	1590.3811
End Point	2529.9937	0.	1599.155

Resultant Force Location and Angle

	X	Y	Z	Angle (X to 1)
	2531.7866	0.	1594.7681	180.

Include Frames Shells Asolids Planes Solids Links

Integrated Forces

	Right Side			Left Side		
	1	2	Z	1	2	Z
Force	13.4265	0.4413	-6.7457	-13.4265	-0.4413	6.7457
Moment	9.1339	83.5324	17.4504	-9.1339	-83.5324	-17.4504

Figura 44: Esfuerzos críticos en los brazos de la estructura USFQ 1 al momento de la falla.

Los esfuerzos axiales y momentos encontrados son muy pequeños para ser considerados como posibles causas del fallo de la estructura. El único parámetro que merece una revisión es el esfuerzo de corte de 6.7kN. De acuerdo con las fórmulas

revisadas en la revisión bibliográfica de hormigones de alta resistencia tenemos que la resistencia al corte puede ser estimada con la ecuación 1 que se presenta a continuación, limitando el valor de f'_c a 69MPa debido a la falta de confinamiento (estribos) en los brazos de la estructura.

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} b_w d \quad (N) \quad (1)$$

$$V_c = 6922.19 \quad (N) = 6.92 \quad (kN)$$

Como se puede ver en los resultados obtenidos, la carga hallada por el modelo computacional es el 97% de la resistencia última al corte que fue predicha por la Fórmula 1. Siendo estos valores tan cercanos se puede apuntar al cortante como la causa de la falla de la estructura, y sin duda permite afirmar que la estructura no estaba diseñada para soportar la carga máxima de 67kN.

Además, los resultados indican que limitar la resistencia del hormigón a 69MPa por la falta de confinamiento es un procedimiento adecuado, con lo cual se ve que la alta resistencia del hormigón desarrollado no está siendo utilizada de manera óptima. Apegándose estrictamente a la teoría, un hormigón de 69MPa pudo haber resistido el mismo esfuerzo de corte que el hormigón utilizado de 109.2 MPa.

Resultados para la estructura USFQ 2

Para analizar esta estructura se cambió las propiedades del refuerzo por las de la varilla “Hughes Brothers Aslan” y se colocó una carga menor de 22kN. Los resultados del análisis de la varilla se muestran en la Figura 45.

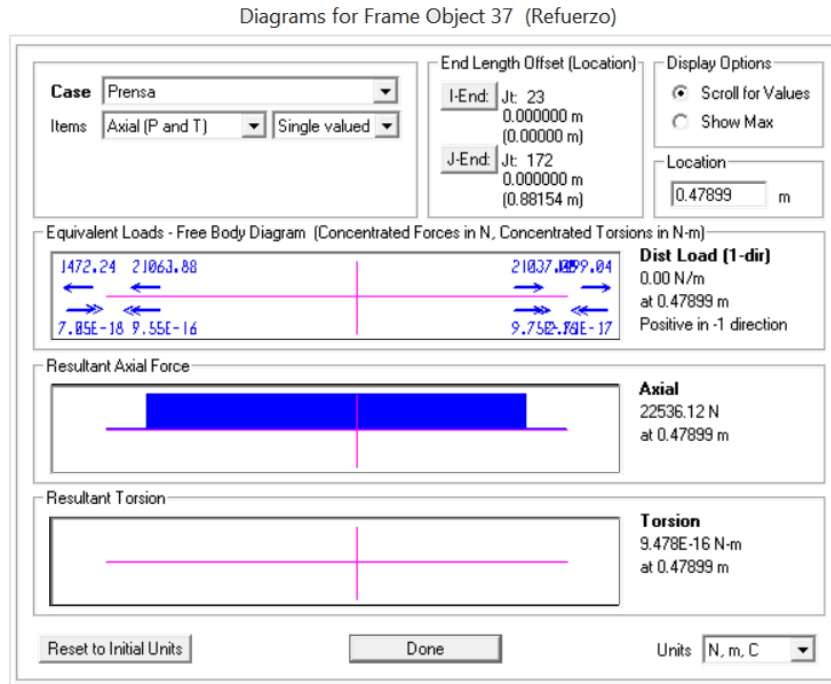


Figura 45: Esfuerzos en la varilla "Hughes Brothers Aslan" al momento de la falla.

Como se puede ver, la varilla muestra una tensión menor de 22.5kN. Pese a ser una tensión menor a la desarrollada en la varilla anterior, la magnitud del esfuerzo es suficiente para empezar a desgastar la superficie de la varilla como se pudo ver en la Figura 32.

Por último, se procede a analizar el cuerpo sólido de hormigón como se muestra en la Figura 46.

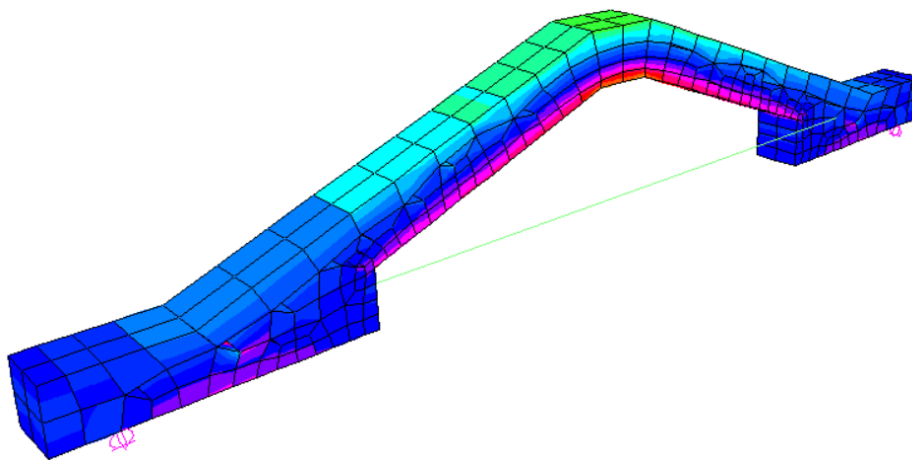


Figura 46: Esfuerzos en el cuerpo de hormigón de la estructura USFQ 2.

Como en el caso anterior, se procede a buscar la sección transversal del sólido que indique los esfuerzos críticos. Los resultados se muestran en la Figura 47.

Section Cut Stresses & Forces

Section Cutting Line

	X	Y	Z
Start Point	2542.5982	0.	1599.1104
End Point	2539.3754	0.	1589.0472

Resultant Force Location and Angle

	X	Y	Z	Angle [X to 1]
	2540.9868	0.	1594.0788	180.

Include Frames Shells Asolids Planes Solids Links

Integrated Forces

	Right Side			Left Side		
	1	2	Z	1	2	Z
Force	-11.2681	0.3318	-5.5036	11.2681	-0.3318	5.5036
Moment	7.16	-67.1509	-14.4032	-7.16	67.1509	14.4032

Figura 47: Esfuerzos críticos en los brazos de la estructura USFQ 2 al momento de la falla.

Aquí los esfuerzos de cortante son menores, de 5.5kN, lo que significa el 80% de la capacidad a cortante de los brazos de la estructura conforme a la ecuación 1. Esta caída en la resistencia de la estructura USFQ 2 con respecto a la estructura USFQ 1 puede deberse a la variabilidad propia de las fallas a cortante.

Pese a esto, tanto la ecuación como el modelo computacional mostrado parecen ser de utilidad para realizar un dimensionamiento a cortante apropiado y se podría incluir un factor de seguridad obtenido a partir de la realización de ensayos de diversas estructuras, tema que se escapa del alcance de esta tesis.

Recomendaciones para diseños futuros

Siendo uno de los objetivos de esta tesis el servir como una guía para participaciones próximas de la USFQ en el concurso del ACI se procede a redactar recomendaciones que permitan aumentar la relación resistencia/costo de la estructura.

Primeramente, basándonos en los análisis realizados en esta tesis, podemos ver que la varilla de FRP a ser empleada en la estructura representa una parte importante del costo total y por tanto el diseño gira alrededor de utilizar su alta capacidad de la mejor manera posible. Siendo el hormigón el material de menor valor, se recomienda aumentar la sección transversal la estructura de modo que se retrase o se impida la falla por cortante. Por la concordancia entre los resultados del modelo computacional y la ecuación 1, se recomienda utilizar ambas en conjunto para realizar el diseño de la estructura a corte.

Se recomienda además reducir la resistencia del hormigón. Como se ha explicado a lo largo de esta tesis, la teoría indica que de no poseer un buen confinamiento una parte de la resistencia del hormigón se “desperdicia” cuando este trabaja a corte. La ecuación 1 va a limitar el valor de f'_c a 69MPa con lo cual se recomienda desarrollar una mezcla de hormigón que bordee este valor. Un hormigón de menor resistencia puede ser obtenido utilizando una menor cantidad de microsílíce (o eliminando su uso) y cambiando a un aditivo reductor de agua de menor costo. Así, el valor por metro cúbico de hormigón puede reducirse de manera considerable produciéndose un beneficio en la relación resistencia costo, lo que estimula aún más a la concepción de una estructura con una mayor área transversal.

Como una recomendación adicional los participantes podrían pensar también en una estructura con forma de arco de manera que el hormigón pueda trabajar a compresión a todo lo largo de la luz.

Limitaciones del análisis

Actualmente la mayor limitación en cuanto al diseño estructural se encuentra en la adecuada predicción del máximo esfuerzo a tensión que el refuerzo puede soportar antes de que se produzca una falla por adherencia. Si bien las estructuras participantes fallaron por cortante, se pudo observar también fisuras en el hormigón circundante al refuerzo, y desgaste en la superficie de las varillas.

Se trató de obtener predicciones apropiadas con la ecuación 12 del capítulo 2 de esta tesis. Sin embargo la ecuación indica que la estructura debería poder soportar una tensión de casi 70kN, que resulta excesivo al ver el estado de las varillas luego de trabajar a aproximadamente 25kN. Los motivos de esta discrepancia pueden deberse a varios factores:

- La ecuación puede no estar desarrollada para hormigones de alta resistencia. El capítulo 12 del ACI318S-11, por ejemplo, obliga a limitar el valor de f'_c a 69MPa al realizar los cálculos de longitud de desarrollo. De seguir este lineamiento la ecuación lleva a predecir una tensión última de 55kN previo a la falla.
- Variabilidad de propiedades y mecanismos de adherencia, característica propia de las varillas de FRP.
- Un área transversal de 50x50mm que proporciona menos de 20mm de recubrimiento a la varilla puede ser insuficiente y no permitir que se desarrollen adecuadamente las fuerzas de adherencia.

Se trató de modelar también a la varilla como un anclaje que hace fallar al concreto al trabajar a tensión. Para esto se utilizó la teoría del Apéndice D de código ACI 318S-11. Sin embargo las ecuaciones llevan a predecir una resistencia al arrancamiento del concreto por tracción del anclaje de tan solo 5.7kN, que es mucho menor a la tensión que se desarrolló en el refuerzo. Los motivos de esta discrepancia pueden ser algunos como por ejemplo:

- El modelo computacional muestra que parte del hormigón circundante se encuentra trabajando a compresión lo que lleva a aumentar su resistencia al arrancamiento en una magnitud desconocida.
- La ecuación y la teoría están desarrolladas para anclajes de acero, pueden existir diferencias importantes en el comportamiento al tratarse de varillas de FRP.

Pese a todo se reconoce que estos dos procedimientos presentan limitaciones importantes y se debería pensar en desarrollar un procedimiento más apropiado para determinar el esfuerzo de tensión máximo que puede existir en el refuerzo previo a una falla por adherencia. Si se mejora de manera importante la resistencia a cortante de la estructura este tema puede llegar a cobrar una mayor importancia.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

Respuestas a las preguntas de investigación

Contrario a lo que se pensaba al inicio de esta tesis, un aumento excesivo de la resistencia del hormigón puede terminar siendo perjudicial a la relación resistencia-costo de la estructura. Esto se debe a que, para alcanzar resistencias altas, la mezcla de hormigón debe incorporar materiales especiales de alto costo, principalmente microsílíce y aditivos reductores de agua, además de requerirse una mayor cantidad de cemento. Dicho aumento en el costo no va acompañado por un aumento en la resistencia de la estructura, ya que, por falta de confinamiento, al trabajar a cortante mucha de la capacidad del hormigón se desperdicia. En conclusión se ha hallado que la práctica de limitar el valor de $f'c$ a 69MPa, al trabajar con hormigón no confinado bajo esfuerzos de cortante, es correcta y se alinea con los resultados experimentales.

Sobre los modelos propuestos para analizar la estructura se puede asegurar que el analizarla como una cercha es un procedimiento en general incorrecto que lleva a sobreestimar la resistencia de la estructura. Esto se debe a que no considera los esfuerzos de corte que se pueden desarrollar en los brazos de la misma, y que llegaron a ser el motivo de falla para la estructura propuesta. El realizar un modelo tridimensional de la estructura en un programa de análisis estructural que funcione a base de elementos finitos (como SAP2000), y utilizarlo para obtener los esfuerzos que se desarrollan en la estructura al ser cargada, parece ser un procedimiento mucho más adecuado. Combinado con las teorías de diseño y ecuaciones expuestas en la revisión bibliográfica de esta tesis, el modelo computacional logra predecir adecuadamente el modo y las cargas de falla de ambas estructuras. Hasta el momento se reconoce que no se cuenta con un modelo adecuado para

realizar un diseño de la estructura por adherencia entre el hormigón y el refuerzo de FRP, donde se encontró problemas como fisuras y desgaste de la superficie del refuerzo.

Sobre la aplicabilidad de estos materiales en proyectos locales se reconoce que, basándose en la información expuesta en esta tesis, no se ha encontrado una razón fundamental para elegir las varillas de FRP sobre las varillas de acero. Aunque las varillas de FRP pueden alcanzar resistencias muy altas mucha de esta no puede ser aprovechada en el diseño por su falta de ductilidad. La misma falta de ductilidad de las estructuras que resultan de utilizar varillas de FRP como refuerzo, es un factor que las hace menos atractivas. Esto combinado con la falta de familiaridad de los profesionales y de la mano de obra ecuatoriana, y la escases de este material en nuestro medio, harían que las varillas de FRP queden restringidas únicamente a proyectos donde las varillas de acero puedan presentar problemas importantes. Sin embargo, en la mayoría de países desarrollados que se encuentran utilizando FRP, el refuerzo se usa principalmente para proyectos viales como puentes. Esta práctica ha nacido de la necesidad de crear estructuras resistentes a la corrosión ya que, por las bajas temperaturas que experimentan, es común el rociar sal en la superficie de rodadura. En el Ecuador no hay zonas con inviernos que presenten temperaturas bajo cero por períodos extendidos, donde se deba prevenir el congelamiento de las calles, por lo que no se espera que la corrosión del refuerzo sea un problema tan severo. En conclusión, de momento no se puede proporcionar al lector de casos específicos donde el uso de varillas de FRP pueda traer ventajas importantes que justifiquen los problemas ya mencionados

El hormigón de alta resistencia presenta un escenario muy diferente. Es un material que proporciona múltiples ventajas debido a que el aumento de resistencia va acompañado

de una mejora en muchas de sus propiedades. Los hormigones de resistencias mayores suelen proporcionar resistencias mayores a cortante (más aún de existir un confinamiento apropiado) y a tensión, una mayor durabilidad, mayor resistencia a la abrasión, etc. En conclusión, sus propiedades pueden ser útiles para una gran variedad de estructuras, sujetas a condiciones de desgaste importantes, o a cargas demasiado altas. Hormigones de resistencias normales necesitarían utilizar secciones excesivamente grandes, aumentando de manera considerable la carga muerta de la estructura. Ejemplos de proyectos que pueden beneficiarse del uso de hormigones de alta resistencia en nuestro país son represas, puentes y edificios de varios pisos de altura.

Sobre la manufacturación de estos productos en el Ecuador, esta tesis ha probado que es posible el desarrollo de hormigones de resistencias muy altas utilizando productos disponibles en nuestro mercado local. Sin embargo, el productor siempre deberá tomar en cuenta que el hormigón de alta resistencia necesita de un control de calidad mucho mayor a los hormigones normales, debido a que sus propiedades pueden variar de una manera mucho más brusca de existir desviaciones en el proceso de producción.

Sobre las varillas de FRP, se han presentado varios métodos de producción, donde se puede ver que su proceso de fabricación es mucho más elaborado y requiere de maquinaria, procesos, y materia prima especializada.

Limitaciones del estudio

Este estudio se ha limitado a presentar modelos que explican adecuadamente el modo de fallo de la estructura, y se espera que sean adecuados para realizar un mejor diseño. Sin embargo no se puede asegurar que los modelos seguirán siendo útiles al aplicar

las recomendaciones que se exponen en esta tesis. Aumentando la sección de hormigón se sospecha que la falla pasará a ser por adherencia, tema que se constituye en la principal limitación de esta tesis pues no se ha logrado proponer un modelo satisfactorio para analizar el desarrollo de estos esfuerzos en la estructura.

Recomendaciones

Se recomienda limitar la resistencia del hormigón a 69MPa pues, por falta de confinamiento, este es el límite teórico que el hormigón simple puede presentar a una falla por contante. Esto se debe sumar al hecho de que, observando los esfuerzos que se desarrollan en la estructura, resulta difícil pensar que se produzca una falla por compresión antes que una falla por cortante. Además, para desarrollar una mezcla de hormigón de resistencia menor podría llegar a eliminarse el uso de materiales especiales (como microsílíce), o al menos disminuir su uso, de tal manera que el costo de la mezcla de hormigón podría disminuir notablemente.

Se recomienda agrandar la sección transversal de toda la estructura. Una mayor sección transversal aumentará la resistencia a corte de la estructura. También puede producir posibles mejoras en adherencia, mejorando el recubrimiento y postergando la aparición y propagación de fisuras. Además, si se desarrolla una mezcla de hormigón de menor costo, puede resultar mucho más factible agrandar la sección transversal sin impactos demasiado severos en el costo.

También se recomienda investigar y desarrollar métodos que permitan analizar los esfuerzos de adherencia presentes en la estructura, o al menos identificar factores que puedan aumentar la resistencia de la estructura a fallas relacionadas con estos esfuerzos.

Por último, podría ser recomendable trabajar con una estructura en forma de arco, en contraste con la figura de tipo triangular aquí expuesta, de manera que se logre eliminar o disminuir los esfuerzos de corte en el hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

ACI 211. (2008). *Guide for selecting proportions for high-strength concrete using Portland cement and other cementitious materials*. Estados Unidos: American Concrete Institute.

ACI 234. (2006). *Guide for the use of silica fume in concrete*. Estados Unidos: American Concrete Institute.

ACI 318. (2011). *Requisitos de reglamento para concreto estructural*. Estados Unidos: American Concrete Institute.

ACI 363. (2010). *Report on high-strength concrete*. Estados Unidos: American Concrete Institute.

ACI 440. (2006). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*. Estados Unidos: American Concrete Institute.

Baena Muñoz, M. (2010). Study of bond behaviour between FRP reinforcement and concrete. (Tesis inédita de doctorado, Universitat de Girona). Recuperado de <http://www.cibem.org/paginas/img/apa6.pdf>

El-Nemr, A., Ahmed, E., & Benmokrane, B. (2013). Flexural behavior and serviceability of normal- and high-strength concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars. *ACI structural journal*, 1077-1087.

Ehsani, M., Saadatmanesh, H., & Tao, S. (1996). Design recommendations for bond GFRP rebars to concrete. *Journal of structural engineering*, 247-253.

Esfahani, M., Rakhshanimehr, M., & Mousavi, S. (2013). Bond strength of lap-spliced GFRP bars in concrete beams. *Journal of composites for construction*, 314-323.

Holland, T. (2005). *Silica fume user's manual*. Washington: Silica Fume Association.

Logan, A., Choi, W., Mirmiran, A., Rizkalla, S., & Zia, P. (2009). Short-term mechanical properties of High-Strength Concrete. *ACI materials journal*, 106, 1-7.

McCallum, B. (2013). Experimental evaluation of the bond dependent coefficient and parameters which influence crack width in GFRP reinforced concrete. (Tesis inédita de maestría). Dalhousie University, Nova Scotia.

Nilson, A. (1999). *Diseño de estructuras de concreto*. Colombia: McGRAW-HILL.
Philips, W. et. al. (2005). *Guía del contratista para la construcción en concreto de calidad*. Estados Unidos: ACI & ASCC.

Portnov, G., Bakis, C., Lackey, E., & Kulakov, V. (2013). FRP reinforcing bars – designs and methods of manufacture. *Mechanics of Composite Materials*, 49, 381-398.

Willie, K., Naaman, A., & Parra-Montesinos, G. (2011). Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. *ACI materials journal*, 46-54.

Zhang, P., Li, Q. (2013). Fracture properties of high performance concrete containing silica fume. *Australian journal of structural engineering*, 14(3), 320-327.

Anexo 1

Condiciones y detalles de la competencia

ACI FRP COMPOSITES COMPETITION

Objectives

These are the challenges in this competition:

- Design, construct, and test a concrete structure reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcement to achieve the lowest cost-load ratio. Cost is defined as the calculated batch cost for concrete materials and chemical admixtures plus the cost of the FRP used to reinforce the structure; adjusted for forming costs for more complicated geometries and reduced by credits given for implementation of sustainable design concepts.
- Predict the ultimate load.
- Predict the load that will result in a piston deflection of 3.5 mm (0.14 in.).
- **Registration opens January 1, 2015.** Comply with the contest rules. The completed **Advance Registration Form is due March 8, 2015.** The Official Mix and Cost Form, and a diagram showing placement and dimensions of all FRP reinforcing materials must be received by March 29, 2015 11:59 p.m.

Prizes

Prizes will be awarded in the following manner:

- First, Second, and Third Prizes will be awarded to the teams in each of two structure type categories (TYPE 1 and TYPE 2), using the evaluation process defined in Paragraph 5. First Prize will be awarded \$750, with \$500 for Second Prize and \$250 for Third Prize.
- Each school shall be eligible for only one prize in each structure type category.
- First-, Second-, and Third-place entries will also be awarded a certificate of recognition, recognition on ACI's website, and will be recognized in *Concrete International* magazine if space allows.

Rules

Read more.

1. THE STUDENT TEAM

1.1. Each team must have a supervising faculty advisor who will see that the student team complies with the rules of the competition. The faculty member is permitted to advise more than one team..

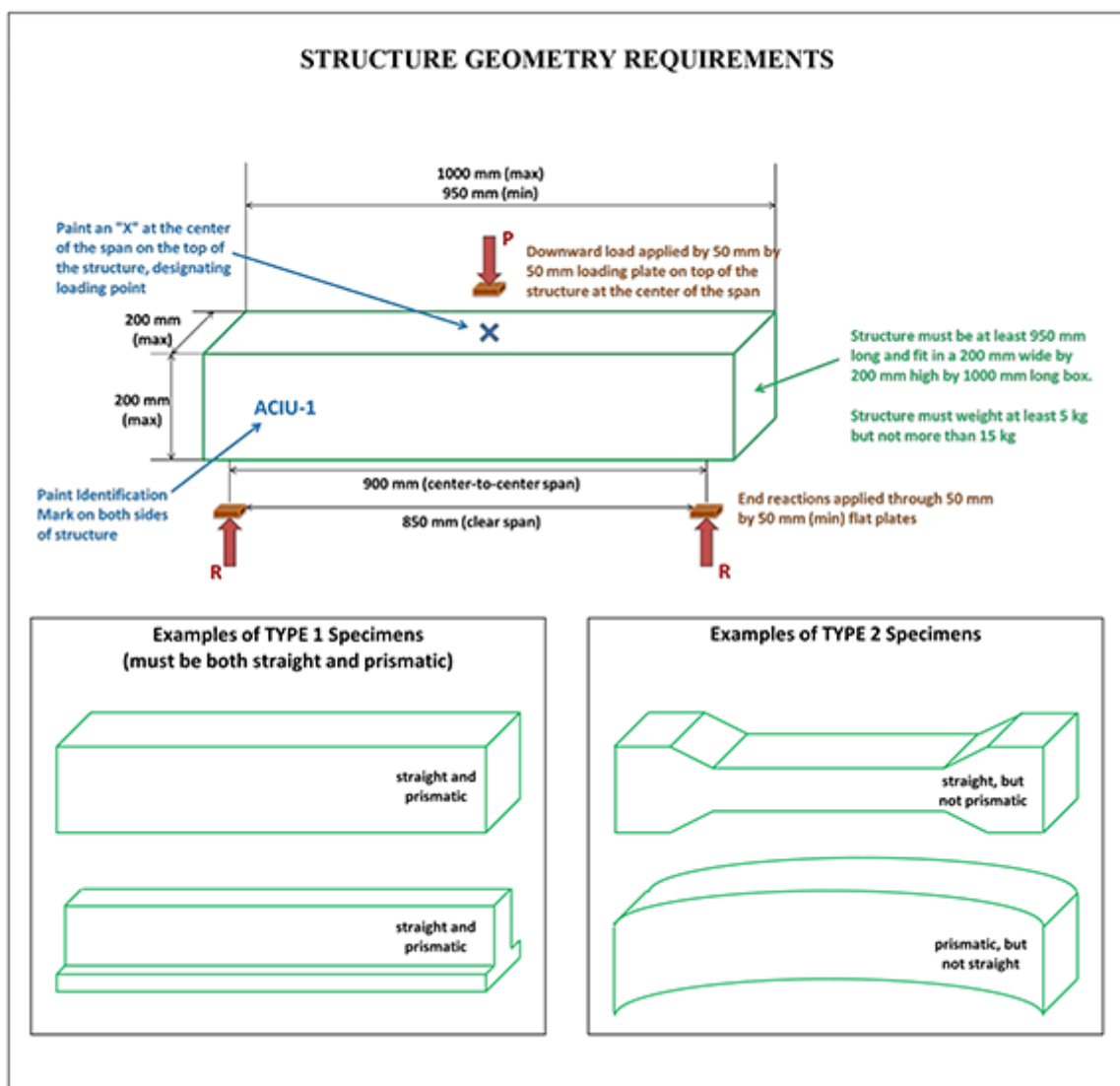
1.2. Each team must consist of not more than five students currently enrolled in an undergraduate program at any college or university worldwide. Undergraduate students on cooperative or internship work assignment are eligible to compete. All members of a given team must be from the same school. A student may not be a member of more than one team.

1.3. It is strongly recommended that at least one individual (faculty advisor or student team member) be designated to represent each team and be present during testing of the structure at the time and location specified for this competition. Participation by additional team members is both permitted and encouraged.

1.4. Each team must complete and submit the **Advance Registration Form - Due March 8, 2015**, the Official Mix and Cost Form, and a diagram showing placement and dimensions of all FRP reinforcing materials by March 29, 2015 11:59 p.m.

1.5. Each school will be permitted to send no more than two teams to the competition. The first two properly completed applications (Advance Registration Form, and Official Mix and Cost Form with reinforcement diagram) will be accepted as that school's entries. Additional teams will only be accepted if an earlier entry from the same school withdraws from the competition.

2. THE MATERIALS AND THE STRUCTURE GEOMETRY



2.1. **Structure Type:** A structure will be classified as a TYPE 1 structure if it is a straight prismatic beam; that is, its cross section is prismatic and the centroid of the cross section (based on the gross concrete cross section) does not vary along the span. A TYPE 1 structure may have a rectangular or non-rectangular cross section; however, if the cross section is non-rectangular then a Complex Formwork cost adjustment will be applied as specified in Paragraph 4.3. Any structure that does not

meet the requirements for TYPE 1 will be designated as a TYPE 2 structure. Any TYPE 2 structure that is non-rectangular in cross section and or nonprismatic along the span will have a Complex Formwork cost adjustment applied as specified in paragraph 4.3. Examples of TYPE 1 and TYPE 2 structures are shown in the Structure Geometry Requirements Diagram.

2.2. Structure Size: Regardless of whether the structure is classified as TYPE 1 or TYPE 2, the structure must fit into a 200 mm (7.87 in.) wide by 200 mm (7.87 in.) high by 1000 mm (39.4 in.) long box. The structure's overall length may not be less than 950 mm (37.4 in.) nor more than 1000 mm (39.4 in.), including any protruding reinforcement. The structure must be able to be placed on supports and loaded as shown in the Structure Geometry Requirements Diagram.

2.3. Structure Markings: At the center of the structure, a large "X" shall be painted on the upper surface where the concentrated load will be applied. In addition, student teams must select an identification mark (for example, the school initials followed by the numeral 1 for team #1 or 2 for team #2), which must be marked so as to be clearly visible on both sides of the structure. Teams may also apply decals of their school logo and/or decorate their entry with felt-tip markers to improve its appearance, if desired. No other markings or surface treatment shall be permitted.

2.4. Structure Weight: Total structure weight must be between 5 kg (11.0 lb) and 15 kg (33.1 lb).

2.5. Structure Materials

2.5.1. Use only materials listed in the Official Mix and Cost worksheet.

2.5.2. The cementitious materials shall consist of any combination of portland cement meeting ASTM C150, or blended cement meeting ASTM C595 or ASTM C1157. Supplementary cementitious materials that may also be used include slag cement ("slag") meeting ASTM C989, fly ash meeting ASTM C618, and/or silica fume meeting ASTM C1240.

2.5.3. Any type of nonmetallic aggregate may be used.

2.5.4. Chemical admixtures meeting ASTM C260, C494, or C1017 are allowed. Epoxies and other polymers, glue, and binders may NOT be used.

2.5.5. Teams must provide the measured weights of all materials used in the concrete batch prepared to cast their competition structure, as specified on the Official Mix and Cost Form.

2.5.6. Every eligible student team submitting the Advance Registration Form will receive an FRP reinforcing materials kit from the manufacturers supplying FRP for the competition. FRP reinforcing materials supplied for the competition are listed in the Official Mix and Cost Worksheet. The FRP reinforcing materials supplied for the competition, along with the manufacturers' data sheets on engineering properties, will be shipped to the U.S. or Canadian address specified on the Advance Registration Form. Due to difficulties in shipping to countries outside the United States and Canada, all teams must provide a shipping address in the United States or Canada. Schools/student teams are responsible for arranging for trans-shipment from the U.S. or Canadian address they provide.

2.5.7. A student team may use any combination of the FRP reinforcing materials supplied for the competition in their structure, but the competition structure must be fabricated with at least one (1) full piece of the FRP reinforcing materials supplied for the competition. The FRP reinforcing material may be cut in any manner. Other reinforcing materials not supplied in the FRP reinforcing materials kit are not allowed. The FRP reinforcing materials may not be prestressed. Mechanical anchorages, if used, must be made from the FRP reinforcing materials supplied for the competition. Students may experiment with the supplied FRP materials.

2.5.8. Students and advisors, in return for receiving the FRP reinforcing materials free of charge, must agree to only use the FRP reinforcing materials supplied to them for purposes directly related to the competition. Failure to comply with the requirement prohibiting the use of FRP reinforcing materials supplied for the competition in other projects will disqualify the student team from the competition and may also disqualify the faculty advisor from participation in future competitions. Should faculty advisors desire to use these types of reinforcements in other projects, they are encouraged to directly contact the manufacturers.

2.6. Structure Construction:

2.6.1. Curing shall be at atmospheric pressure, and the curing temperature must not exceed the boiling point of water at atmospheric temperature.

2.6.2. No structure shall be more than 56 days old at the time of the test.

2.6.3. Reinforcing support wires and/or chairs are not permitted in the 850 mm clear span. Any manner of bar support may be used outside the clear span, as long as the bar support does not act to enhance the behavior of the structure, such as by anchoring the bar in the concrete; these bar supports are NOT included in the total cost. Mechanical anchorages, if used, must be made from the materials provided, as specified in paragraph 2.5.7 and ARE included in the total cost.

2.7. Submissions:

2.7.1. Teams must submit a 75 x 150 mm (3 x 6 in.) cylinder placed from the same concrete batch as that used to place the competition structure. The cylinder MUST be identified with the same structure identification mark and MUST be submitted with the structure on the day of the competition. The cylinder will be used by ACI as required by the judges to confirm materials used. Teams failing to submit the required cylinder will be disqualified from the competition.

2.7.2. Teams must also provide a diagram showing placement and dimensions of all FRP reinforcing materials used. The diagram must include the structure identification mark and must be submitted along with the Official Mix and Cost Form by the date specified on the competition website. Teams are encouraged to prepare an 11 x 17 in. poster with their school name and logo, their structure identification mark, and the names of student team members and faculty advisor to be displayed with their structure at the competition.

2.7.3. Entries not meeting the specified requirements may be tested if time permits but will not be eligible for prizes. **MODIFICATION OF ENTRIES SHALL NOT BE PERMITTED AT THE COMPETITION SITE.**

3. THE TESTING PROCESS:

3.1. Entries will be weighed and measured, and those judged acceptable by the FRP Competition Committee will be positioned in the testing apparatus, which will apply a midspan concentrated load by means of a pivoting load plate. The center-to-center span is 900 mm (35.4 in.) and reaction forces are through bearing surfaces measuring not less than 50 mm (2 sq in.) by 50 mm (2 sq in.) and providing no restraint against rotation at the ends of the structure.

3.2. Once seated in the testing apparatus, a seating load of approximately 0.25 kN (56 lb) will be applied and recorded. Additional load will be applied until the structure fails or is loaded to the test fixture's capacity of 67 kN (15,000 lb). In lieu of obvious physical signs of failure, after initial cracking, failure will be assumed to have occurred when total load on the structure has decreased to 75% of the maximum load achieved by that structure. The loading rate will be determined by adjusting the cylinder's manual speed setting so that the manual speed valve is closed hand-tight. This setting will correspond to a piston movement of approximately 2.5 mm/minute, but may be affected by the stiffness of the structure. Deflection will be measured as the movement of the loading piston, which is assumed to correspond to deflection of the structure at the loading plate.

3.3. The maximum load achieved (P_{ult}) will be recorded as the maximum load prior to failure or 67 kN (15,000 lb), whichever is smaller, without deduction of the seating load.

3.4. The load corresponding to a deflection of 3.5 mm (0.14 in.) will also be recorded. To arrive at the load corresponding to this deflection ($P_{3.5}$), the measured load will be reduced by the 0.25 kN (56 lb) seating load (for which no deflection was measured). If a structure fails to reach a deflection of 3.5 mm (0.14 in.) prior to failing or reaching the test fixture's capacity of 67 kN (15,000 lb), ($P_{3.5}$) will be taken as the maximum load achieved (as specified in Paragraph 3.3) less the seating load of 0.25 kN (56 lb).

4. STRUCTURE COST:

4.1. The Final Cost (**COST**) will be calculated as the sum of the material cost for the individual materials used to produce each entry times the Complex Formwork and Sustainability Credit Multipliers, as specified in the Official Mix and Cost Worksheet.

4.2. The cost for FRP reinforcing materials will be calculated on a per-piece basis and will NOT be prorated when less than the full piece of an FRP reinforcement is used. (For example, an entry that uses one complete piece of FRP reinforcement as required by Paragraph 2.5.7 and a part of another piece of FRP reinforcement as permitted by Paragraph 2.5.7 would be assigned the material cost associated with two full pieces of FRP reinforcing materials.)

4.3. Complex Formwork Multipliers will be assigned to account for the additional costs of more involved cross sections. Complex Formwork Multipliers will be applied to only the concrete material costs. Multipliers will be assigned for the following geometries:

4.3.1. If the cross section is nonrectangular, a multiplier of 1.1 will be applied to the concrete material costs;

4.3.2. If the cross section is nonprismatic (i.e. varies in the clear span), a multiplier of 1.1 will be applied to the concrete material costs;

4.4. Sustainability credits will be granted for reduction in cement content and for use of recycled supplementary cementitious materials (SCMs). The Sustainability Credit Multiplier will be applied to both the concrete and the FRP material costs. The Sustainability Credit Multiplier will be calculated by subtracting the sum of the sustainability credits awarded from 100%. Sustainability Credits will be awarded for implementation of the following sustainable design concepts:

4.4.1. If the measured batch weight of cement (in lb or kg) is less than 15% of the total batch weight (in lb or kg) of all concrete materials, as reported on the Mix and Cost Form worksheet, a 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.2. If the measured batch weight of cement (in lb or kg) is less than 10% of the total batch weight (in lb or kg) of all concrete materials, as reported on the Mix and Cost Form worksheet, an additional 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.3. If the measured batch weight of cement (in lb or kg) is less than 5% of the total batch weight (in lb or kg) of all concrete materials, as reported on the Mix and Cost Form worksheet, an additional 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.4. If the measured batch weight (in lb or kg) of fly ash is more than 20% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag cement [slag], and silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, a 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.5. If the measured batch weight (in lb or kg) of fly ash is more than 30% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag, and silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, an additional 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.6. If the measured batch weight (in lb or kg) of fly ash is more than 40% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag, and silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, an additional 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.7. If the measured batch weight (in lb or kg) of slag cement (slag) is more than 20% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag, and silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, a 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.8. If the measured batch weight (in lb or kg) of slag is more than 35% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag, and silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, an additional 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.9. If the measured batch weight (in lb or kg) of slag is more than 50% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag, and silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, an additional 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.10. If the measured batch weight (in lb or kg) of silica fume is more than 5% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag, and silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, a 1% sustainability credit will be awarded;

4.4.11. If the measured batch weight (in lb or kg) of silica fume is more than 10% of the sum of the measured batch weights (in lb or kg) of all cementitious materials (including cement, fly ash, slag, and

silica fume), as reported on the Mix and Cost Form worksheet, an additional 1% sustainability credit will be awarded.

5. THE EVALUATION PROCESS:

5.1. The Cost-Load Ratio (R_1) will be calculated as the Final Cost of the structure, as defined in Paragraph 4, divided by the maximum load achieved (P_{ult}), as defined in Paragraph 3.3.

$$R_1 = \text{COST} / P_{ult,measured}$$

5.2. The Maximum Load Prediction Ratio (R_2) will be calculated as the absolute value of the percent difference between predicted and measured values for P_{ult} as follows:

$$R_2 = 100\% * \text{ABS}[(P_{ult,predicted} - P_{ult,measured}) / P_{ult,measured}]$$

5.3. The 3.5 mm Deflection Load Prediction Ratio (R_3) will be calculated as the absolute value of the percent difference between predicted and measured values for $P_{3.5}$ as follows:

$$R_3 = 100\% * \text{ABS}[(P_{3.5,predicted} - P_{3.5,measured}) / P_{3.5,measured}]$$

5.4. Teams will be ranked in ascending order in each of three categories based on the Ratios defined in paragraphs 5.1 to 5.3. For example, the team with the lowest Cost-Load Ratio will be ranked 1, the team with the second-lowest ratio will be ranked 2, etc. Teams will be ranked separately in each structure type category (TYPE 1 and TYPE 2) for each of the three ratios.

5.5. A team's final ranking points will be determined by multiplying its ranking in the Cost-Load Ratio by 0.50 and the ranking in each of the other two categories by 0.25. For example, a team finishing third in the Cost-Load Ratio, second in the Maximum Load Prediction Ratio, and seventh in the 3.5 mm Deflection Load Prediction Ratio would receive 3.75 ranking points, computed as follows: $[(0.50*3)+(0.25*2)+(0.25*7)=3.75]$. Ties will be broken by the ranking in the Cost-Load Ratio category.

5.6. Within each structure type category (TYPE 1 and TYPE 2), the team with the lowest final ranking points will be declared the winner, and all other groups will be ranked based on final ranking points in ascending order. Each school shall be eligible for only one prize in each structure type category.

Anexo 2

Hojas de especificaciones de las varillas de FRP entregadas a los participantes

Aslan 100 Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Rebar Product Data Sheet

Physical / Mechanical Properties – Tensile, Modulus & Strain

Nominal Diameter		Nominal Area		f_{tu}^* - Guaranteed Tensile Strength		Ultimate Tensile Load		E_f - Tensile Modulus of Elasticity		Ultimate Strain	
Size	mm	in	mm ²	in ²	MPa	ksi	kN	kips	GPa	psi 10 ⁶	%
2	6	¼	31.67	0.049	896	130	28.34	6.37	46	6.7	1.94%
3	10	⅜	71.26	0.110	827	120	58.72	13.20	46	6.7	1.79%
4	13	½	126.7	0.196	758	110	95.90	21.56	46	6.7	1.64%
5	16	⅝	197.9	0.307	724	105	143.41	32.24	46	6.7	1.57%
6	19	¾	285.0	0.442	690	100	196.60	44.20	46	6.7	1.49%
7	22	⅞	387.9	0.601	655	95	254.00	57.10	46	6.7	1.42%
8	25	1	506.7	0.785	620	90	314.27	70.65	46	6.7	1.34%
9	29	1-⅛	641.3	0.994	586	85	375.83	84.49	46	6.7	1.27%
10	32	1-¼	791.7	1.227	551	80	436.60	98.16	46	6.7	1.19%
11*	35	1-⅜	958.1	1.485	482	70	462.40	104*	46	6.7	1.04%
12*	38	1-½	1160	1.800	448	65	520.40	117*	46	6.7	0.97%
13*	41	1-⅝	1338	2.074	413	60	553.50	124*	46	6.7	0.90%

* Tensile properties of #11, #12 & #13 bar are NOT guaranteed due to the inability to achieve a valid bar break per ASTM D7205.

Hughes Brothers reserves the right to make improvements in the product and/or process which may result in benefits or changes to some physical-mechanical characteristics. The data contained herein is considered representative of current production and is believed to be reliable and to represent the best available characterization of the product as of July 2011. Tensile tests per ASTM D7205.

Design Tensile & Modulus Properties per ASTM D7205-06. The area used in calculating the tensile strength is the nominal cross sectional area. The "Guaranteed Tensile Strength", f_{tu} is as defined by ACI 440.1R as the mean tensile strength of a given production lot, minus three times the standard deviation or $f_{tu} = f_{u,ave} - 3\sigma$. The "Design or Guaranteed Modulus of Elasticity is as defined by ACI 440.1R as the mean modulus of a production lot or $E_f = E_{f,ave}$.

Material Certs & Traceability Available for any production lot of Aslan 100 bar, traceable by bar marks imprinted on the bar in intervals showing the bar diameter, stock order and production date.

Cross Sectional Area Tolerance - 0% / + 20%

Design properties are determined using "Nominal" diameters and equivalent calculated cross sectional areas. Surface undulations and sand coatings that facilitate bond are accommodated for in ASTM D7205, section 11.2.5, with a tolerance of minus zero, plus 20% as determined by the Archimedes method of volume displacement in a fluid.

Bond Dependent Coefficient $k_b = 0.9$

per ASTM draft test method. As used in ACI equation 8-9.

Glass Fiber Content > 70% by weight per ASTM D2584

Transverse Shear Strength > 22,000 psi (150MPa)

per ASTM D7617 & ACI 440.3R method B.4

Void Content No Continuous Voids after 15 minutes of capillary action, per ASTM D5117

Moisture Absorption 24 hour absorption at 122°F (50°C)

≤ 0.25%, per ASTM D570

Density

Diameter		Unit Weight / length		
Size	mm	in	kg / m	lbs / ft
2	6	¼	0.0774	0.052
3	10	⅜	0.0159	0.107
4	13	½	0.2813	0.189
5	16	⅝	0.4271	0.287
6	19	¾	0.6072	0.408
7	22	⅞	0.8096	0.544
8	25	1	1.0462	0.730
9	29	1-⅛	1.4137	0.950
10	32	1-¼	1.7114	1.15
11	35	1-⅜	1.9346	1.30
12	38	1-½	2.4554	1.65
13	41	1-⅝	2.8721	1.93

Bent Bars & Stirrups

- Must be made at the factory, field bending not permitted.
- Industry standard bent shapes are available, standard shape codes are used.

Some limitations include:

- Max leg length of a stirrup is 60" (152cm)
- Redirection of bends, such as Z-shapes or gull-wings types are not very economical. Bent shapes should continue in the same circular direction.
- Closed square shapes are best furnished as pairs of U-bars or continuous spirals.
- A 90-degree bend with $12d_b$, bar diameter, pigtail used to shorten development length is equally as effective as a J-shape as per ACI 440.1R.
- The radius on all bends is fixed as per the table shown. Some U-shaped stirrups fall in between the range of these two bend radiuses and are not possible.

We advise that you work closely with the factory to implement the most economical detailing of bent bars and stirrups.

Field Forming of Large Radius Curves

Permitted when the radius is larger than in the following table. The table gives the minimum allowable radius for induced bending stresses without any consideration for additional sustained structural loads.

Diameter	Interior Use $C_e = 0.8$ Min Radius		Exterior Use $C_e = 0.7$ Min Radius	
	mm	in	cm	in
2	6	1/4	107	42
3	10	3/8	170	67
4	13	1/2	246	97
5	16	5/8	323	127
6	19	3/4	404	159
7	22	7/8	495	195
8	25	1	597	235
9	29	1-1/8	711	280
10	32	1-1/4	871	343
11	35	1-3/8	1052	414
12	38	1-1/2	1237	487
13	41	1-5/8	1448	570

Handling and Placement

- Follow guidelines in ACI440.5-08 "Specification for Construction with FRP Bars".
- In general, field handling and placement is the same as for epoxy or galvanized steel bars.
- Do NOT shear FRP bars. When field cutting of FRP bars is necessary, use a fine blade saw, grinder, carborundum or diamond blade.
- Sealing the ends of FRP bars is not necessary.
- Support chairs are required at two-thirds the spacing of steel rebar.
- Plastic coated tie wire is the preferred option for most projects. When completely non-ferrous reinforcing, i.e., no steel is required in the concrete, nylon zip ties (available from local building materials centers) or plastic bar clips are recommended. (Don't forget to use non-metallic form ties in formwork.)
- It is possible, especially in precast applications, for GFRP bars to "float" during vibrating. Care should be exercised to adequately secure GFRP in the formwork.

Bend Radius

Size	Diameter		Inside Bend Radius	
	mm	in	mm	in
2	6	1/4	38	1.5
3	10	3/8	54	2.125
4	13	1/2	54	2.125
5	16	5/8	57	2.25
6	19	3/4	57	2.25
7	22	7/8	76	3.0
8	25	1	76	3.0

Strength of the Bent Portion of the Bar

.... > 50% strength of the straight length of the bar, per ACI 440.3R method B.5

Characteristic Properties - Characteristic Properties are those that are inherent to the FRP bar and not necessarily measured or quantified from production lot to production lot.

Durability – Alkali Resistance ~ without load

.... > 80% strength retention, when exposed to 12.8pH solution for 90 days at 140°F (60°C)

Tensile Strength at Cold Temperature < 5% strength reduction from ambient at -40°F (-40°C), per ASTM D7205.

Transition Temperature of Resin - T_g > 230°F (110°C) per DSC method

Aslan FRP



Product Guide Specification



A. Marshall Composite Technologies, LLC, 2873 22nd St. NE, Salem, OR 97302.
Phone (503)726-0526. Web Site <http://www.marshallcomposite.com>.

F. Dimensions: Nominal Diameter and Sectional Area:

US Size	Nominal Diameter, inches	Area, in ²	Weight, lb/ft	Soft Metric Size	Nominal Diameter, mm	Area, mm ²	Weight, Kg/m
#3	0.375	0.110	0.10	#10	9.5	71	0.046
#4	0.500	0.196	0.17	#13	12.7	126	0.077
#5	0.625	0.307	0.28	#16	15.9	198	0.127
#6	0.750	0.442	0.41	#19	19.0	285	0.186

G. Tensile Properties:

Bar Size Designation		Tensile Modulus of Elasticity		Ultimate Tensile Strength		Guaranteed Design Tensile Strength		Allowable Tensile Stress (Working Stress Limit)		Ultimate Strain in Tension	Poisson's Ratio
		E_t		F_u		f_u		$f_{t,a}$	ϵ_u		
mm	in	Gpa	Msi	MPa	Ksi	MPa	Ksi	MPa	Ksi	%	
#10	#3	42	6	840	121	780	113	195	28	2.00	0.27
#13	#4	42	6	800	116	725	105	181	26	1.90	0.27
#16	#5	40	5.8	780	113	655	95	164	24	1.95	0.27
#19	#6	40	5.8	720	104	630	91	158	23	1.80	0.27

I. Coefficient of Thermal Expansion (C.T.E.):

1. Longitudinal Direction: 8×10^{-6} per degree C (4.5×10^{-6} per degree F).
2. Transverse Direction: 32×10^{-6} per degree C (18×10^{-6} per degree F).



Revision: May 2011

V-Rod standard straight bars only, does not apply to bent bars

	#2 GFRP V-ROD	#3 GFRP V-ROD	#4 GFRP V-ROD	#5 GFRP V-ROD	#6 GFRP V-ROD	#7 GFRP V-ROD	#8 GFRP V-ROD	#9 GFRP V-ROD
Minimum guaranteed tensile strength *	MPa 938	MPa 889	MPa 941	MPa 934	MPa 807	MPa 816	MPa 816	MPa 703
	kSI 136	kSI 129	kSI 136	kSI 135	kSI 117	kSI 118	kSI 118	kSI 102
Nominal tensile modulus	GPa 52.5 ±2.5	GPa 53.4 ±2.5	GPa 53.6 ±2.5	GPa 55.4 ±2.5	GPa 56.6 ±2.5	GPa 53.5 ±2.5	GPa 52.9 ±2.5	GPa 52.9 ±2.5
	kSI 7609 ±363	kSI 7739 ±363	kSI 7768 ±363	kSI 8029 ±363	kSI 8203 ±363	kSI 7754 ±363	kSI 7667 ±363	kSI 7667 ±363
Tensile strain	% 1.79	% 1.66	% 1.76	% 1.69	% 1.43	% 1.53	% 1.53	% 1.33
Poisson's ratio	(-) 0.25	(-) 0.21	(-) 0.26	(-) 0.25	(-) 0.25	(-) 0.25	(-) 0.25	(-) 0.28
Nominal Flexural strength	MPa 1200	MPa 1161	MPa 1005	MPa 930	MPa 882	MPa 811	MPa 811	MPa 776
	kSI 174	kSI 168	kSI 146	kSI 135	kSI 128	kSI 117	kSI 117	kSI 112
Nominal Flexural modulus	GPa 48.8	GPa 46.1	GPa 46.8	GPa 46.8	GPa 45.1	GPa 44.6	GPa 44.6	GPa 45.1
	kSI 7071	kSI 6685	kSI 6787	kSI 6786	kSI 6533	kSI 6466	kSI 6466	kSI 6539
Flexural strain	% 2.46	% 2.52	% 2.15	% 1.99	% 1.96	% 1.82	% 1.82	% 1.72
Nominal Bond strength	MPa 14	MPa 14	MPa 14	MPa 14	MPa 14	MPa 14	MPa 14	MPa 14
	psi 2029	psi 2029	psi 2029	psi 2029	psi 2029	psi 2029	psi 2029	psi 2029
Bond dependent coefficient	(-) 0.8	(-) 0.8	(-) 0.8	(-) 0.8	(-) 0.8	(-) 0.8	(-) 0.8	(-) 0.8

Longitudinal coefficient of thermal expansion	XE-6/°C		XE-6/°F	
	6.2	3.5	23.8	13.2
Transverse coefficient of thermal expansion	13.2		0.21	
Moisture absorption	0.65		0.47	
Glass content	83		65	
Weight	g/m 95	lb/ft 0.064	g/m 181	lb/ft 0.122
Effective cross-sectional area (including sand coating) **	mm ² 47.0	in ² 0.0729	mm ² 95.0	in ² 0.1473
Nominal cross-sectional area	mm ² 31.7	in ² 0.0491	mm ² 126.7	in ² 0.1104

* the minimum guaranteed tensile strength must not be used to calculate the strength of the bent portion of a bent bar. Instead use the minimum guaranteed tensile strength found in the technical data sheet of bent V-Rod bars.
 ** Please contact the manufacturer for dowelling applications. Development and splice lengths are available upon request but should be properly calculated by a design engineer.

Please refer to the bent bar data sheet for designs using bent V-Rod bars.
 It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet.



January 30th 2013

TUF-BAR® 60 GPa Straight Bars	Units	#4
Average Ultimate Tensile Strength	MPa	1292.5
(ASTM D7205 / CAN/CSA-S806)	ksi	187.5
Minimum Guaranteed Ultimate Tensile Strength	MPa	1165.6
(ASTM D7205 / CAN/CSA-S806)	ksi	169.1
Minimum Modulus of Elasticity	GPa	64.7
(ASTM D7205 / CAN/CSA-S806)	ksi	9386
Tensile Strain	%	2.00

Transverse Shear Strength	MPa	246.7
(ACAI 440.3R B4)	ksi	35.8
Transverse Shear Capacity	kN	63.7
(ACAI 440.3R B4)	lbf	14309

Longitudinal Thermal Expansion Coefficient	10 ⁻⁶ /°C	6.0
(ASTM E831)	10 ⁻⁶ /°F	3.3
Transverse Thermal Expansion Coefficient	10 ⁻⁶ /°C	18.7
(ASTM E831)	10 ⁻⁶ /°F	10.4

Water Absorption (ASTM D570)	%	0.49
Glass Content (ASTM D2584)	%	85.0
Glass Transition Temperature (DSC)	°C	115.5
Density (ASTM D792)	g/cm ³	2.18
Linear Weight	g/m	349
	lb/ft	0.234

Effective Cross Sectional Area (including coating)	mm ²	166
(CSA S807 Annex A)	inch ²	0.258
Nominal Cross Sectional Area	mm ²	129
(CSA S807)	inch ²	0.200
Effective Diameter (including coating)	mm	14.6
(CSA S807 Annex A)	inch	0.573
Nominal Diameter	mm	13
(CSA S807)	inch	1/2



Revision: Oct 2012

V-Rod HM straight bars only; there are no HM bent bars

	#3 GFRP	#4 GFRP	#5 GFRP	#6 GFRP	#7 GFRP	#8 GFRP	#10 GFRP
Minimum guaranteed tensile strength * (ASTM D7205)	V-ROD HM	V-ROD HM	V-ROD HM	V-ROD HM	V-ROD HM	V-ROD HM	V-ROD HM
	MPa	1372	1312	1184	1105	1059	1000
	Ksi	199	190	172	160	153	145
Nominal tensile modulus (ASTM D7205)	GPa	65.1 ±2.5	65.6 ±2.5	62.6 ±2.5	63.7 ±2.5	62.6 ±2.5	66.4 ±2.5
	Ksi	9435 ±363	9507 ±363	9072 ±363	9232 ±363	9072 ±363	9623 ±363
Tensile strain	%	2.11	2.00	1.89	1.73	1.69	1.51
Poisson's ratio	(-)	0.25	0.26	0.25	0.25	0.26	0.28

Nominal Flexural strength (ASTM D790)	MPa	1734	1377	1239	1196	1005	1064	1105
	Ksi	251	200	180	173	146	154	160
Nominal Flexural modulus (ASTM D790)	GPa	65.5	64.9	63.5	60.2	60.0	65.4	65.8
	Ksi	9493	9406	9203	8725	8696	9478	9536
Flexural strain	%	2.65	2.12	1.95	1.99	1.88	1.63	1.68

Transverse shear capacity (ACI 440.3R B4 two cross sections)	kN	41	67	94	127	156	187	232
	lbf/s	9217	15062	21131	28550	35069	42038	52154

Nominal Bond strength (ACI 440.3R B9)	MPa	14
	psi	2029
Bond dependent coefficient	(-)	0.8

Longitudinal coefficient of thermal expansion (ASTM E831)	XE-6/C	6.2						
	XE-6/F	3.5						
Transverse coefficient of thermal expansion (ASTM E831)	XE-6/C	23.8						
	XE-6/F	13.2						
Moisture absorption (ASTM D570)	%	0.25	0.38	0.44	0.38	0.21	0.29	0.29
	% vol				65			
Glass content (ASTM D3171)	% weight				83			
	g/m	243	380	558	811	1156	1524	2488
Weight	lb/ft	0.163	0.255	0.375	0.545	0.777	1.024	1.672
	mm ²	170.0	197.0	291.0	394.0	550.0	674.0	1028.0
Effective cross-sectional area (including sand coating) ** (CSA S806 Annex A)	inch ²	0.2635	0.3054	0.4511	0.6107	0.8525	1.0447	1.5934
	mm ²	71.3	126.7	197.9	285.0	388.0	506.7	791.7
Nominal cross-sectional area	inch ²	0.1105	0.1963	0.3068	0.4418	0.6013	0.7854	1.2272
	mm ²							

* the minimum guaranteed tensile strength must not be used to calculate the strength of the bent portion of a bent bar. Instead use the minimum guaranteed tensile strength found in the technical data sheet of bent V-Rod bars.

** Please contact the manufacturer for dowelling applications. Development and splice lengths are available upon request but should be properly calculated by a design engineer.

Please refer to the bent bar data sheet for designs using bent V-Rod bars. It is the responsibility of the design engineers to contact the bar manufacturer to get the latest updates of this technical data sheet (also available at www.pultrall.com).

Anexo 3
Hoja de costos equipo USFQ1



ACI SPRING 2013 CONVENTION - STUDENT "FRP COMPOSITES" COMPETITION
Official Mix Design and Cost Form (Page 1 of 2)

An electronic version of this form must be submitted by Apr. 2, 2013 to students@concrete.org.

A hardcopy of this form must be submitted with the test specimens on April 14, 2013.

By submitting this form, I, the faculty advisor, acknowledge this information is correct. The students have adhered to the contest rules, and the specimens have been made and cured in compliance with the rules.

School: UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO Faculty Advisor: DR. FABRICIO YEPEZ, Ph.D.

Date Cast: March 27 Beam Mark: USFQ 1 Batch Size (cubic feet): 0.22

Name 1:	FRANCISCO CALDERON
Degree/Graduation Date:	may-14
Name 2:	MARIA EMILIA PONTON
Degree/Graduation Date:	jun-14
Name 3:	GUSTAVO TAPIA
Degree/Graduation Date:	ene-14
Name 4:	ROBERTO MERINO
Degree/Graduation Date:	ene-14
Name 5:	FRANCISCO JATIVA
Degree/Graduation Date:	ene-14

FOR MIX DESIGNS IN SI UNITS, USE THE "SI UNITS CONVERSION" PAGE TO CONVERT TO US UNITS

Concrete Materials				Mix Design for 1 Cubic Yard		
Material	Brand	Description	Specific Gravity	Volume (cf)	SSD Weight (lbs)	Measured Batch Weight (lbs)
Coarse Aggregate	Toachi River	Basaltic stone 3/8" max.	2.72	9.29	1,576	12.9
Sand	Toachi River	Basaltic stone 2mm max	2.75	6.16	1,055	8.7
Cement ASTM C150	Chimborazo	Portland Type II	3.14	5.40	1,060	8.7
Silica Fume	REOMAC-BASF	ASTM C240	2.20	0.86	118	1.0
Water			1.00	4.54	283	2.3
Admixture	BASF Glenium 3400NV	polycarboxilate	1.10	0.24	17	0.0
Air		1.9% of total volume		0.51		
TOTAL MEASURED BATCH WEIGHT				27.00	4,109	33.6

Total volume from mix design calculations should equal 27.00 cf. Measured Batch Weight is the weights of all materials used to mix your concrete (excluding admixtures).

Chemical Admixtures				
Type	Brand	Description	Dosage (oz/cwt)	Batch Dosage (oz)
High range water reducer	BASF Glenium N3400NV	ASTM C240	22.23	1.9

Water-Cement Ratio: 0.24 Slump (in): 7.10 Density (pcf): 152.2

7 Day Strength (psi) Cylinder 1 11175.15 Cylinder 2 10544.24 Cylinder 3 11397.06

FRP Reinforcing Materials			
Type	Brand	Description	Number of Pieces Used
GFRP bar standard modulus	Marshall Industries c-bar	glass fiber reinforcement bar	1.00



ACI SPRING 2013 CONVENTION - STUDENT "FRP COMPOSITES" COMPETITION
Official Mix Design and Cost Form (Page 2 of 2)

An electronic version of this form must be submitted by Apr. 2, 2013 to students@concrete.org.

A hardcopy of this form must be submitted with the test specimens on April 14

ON THIS PAGE, FILL IN ONLY THE YELLOW CELLS

FOR SI MIX DESIGNS, USE "SI UNITS CONVERSION" PAGE, THEN ENTER CONVERTED VALUES HERE

Concrete Materials	Cost/Unit	Unit	Batch Quantity (lbs)	Cost/Batch
Coarse Aggregate	\$19.00	Ton	12.9	\$0.12
Fine Aggregate	\$12.00	Ton	8.7	\$0.05
Lightweight Aggregate	\$120.00	Ton	0.0	\$0.00
Portland Cement meeting ASTM C150	\$110.00	Ton	8.7	\$0.48
Blended Cement meeting ASTM C595	\$110.00	Ton	0.0	\$0.00
Blended Cement meeting ASTM C115	\$110.00	Ton	0.0	\$0.00
Fly Ash meeting ASTM C618	\$55.00	Ton	0.0	\$0.00
Slag meeting ASTM C989	\$95.00	Ton	0.0	\$0.00
Silica Fume meeting ASTM C1240	\$500.00	Ton	1.0	\$0.25
Water	\$10.00	1,000 gallons	2.3	\$0.00
TOTAL BATCH WEIGHT & CONCRETE MATERIAL COST			33.6	\$0.91

Chemical Admixtures	Cost/Unit	Unit	Batch Quantity (oz)	Cost/Batch
Air-Entrainment	\$3.85	Gallon	0.0	\$0.00
Normal Water Reducer	\$4.25	Gallon	0.0	\$0.00
Mid-Range Water Reducer	\$7.75	Gallon	0.0	\$0.00
High-Range Water Reducer (non-polycarboxylate)	\$8.50	Gallon	0.0	\$0.00
High-Range Water Reducer (polycarboxylate)	\$15.00	Gallon	1.9	\$0.22
Retarder	\$8.25	Gallon	0.0	\$0.00
Accelerator (non-chloride)	\$7.75	Gallon	0.0	\$0.00

FRP Reinforcing Materials	Cost/Unit	Unit	Quantity (pieces)	Cost/Structure
#4 GFRP Reinforcing Bars - standard modulus	\$1.75	Pieces	1	\$1.75
#4 GFRP Reinforcing Bars -High Modulus (HM)	\$2.44	Pieces	0	\$0.00
CFRP Grid - 33" length of C12 with 4 strands in 6" width	\$2.03	Pieces	0	\$0.00
Material Cost Subtotal:				\$2.88

Formwork Penalties	Enter 1 for yes, 0 for no	Formwork Multiplier	Formwork Cost
Is cross section rectangular?	1	If Rectangular = 1; If not = 1.1	\$0.00
Is cross section prismatic?	1	If Prismatic = 1; If not = 1.1	\$0.00
Formwork Cost Subtotal:			\$0.00

Sustainability Credits			Points Awarded	
Percent Cement	25.89%	Less than 15% = 1; Less than 10% = 2; Less than 5% = 3	0.0	
Percent Flyash	0.00%	More than 20% = 1; more than 30% = 2; more than 40% = 3	0.0	
Percent Slag	0.00%	More than 20% = 1; more than 35% = 2; more than 50% = 3	0.0	
Percent Silica Fume	10.31%	More than 5% = 1; more than 10% = 2	2.0	
Total Sustainability Points			2.0	
Sustainability Credit Multiplier:			0.98	

Final Cost = Material Cost Subtotal X Sustainability Credit Multiplier + Formwork Cost	\$2.82
---	---------------

PREDICTED LOADS – Report in kilonewtons (kN)	
DIVIDE PREDICTIONS MADE IN LBS BY 224.8 TO GET THE PREDICTIONS IN kN TO ENTER BELOW	
DEFLECTION OF 3.5 mm (0.14 in). This is P _{est @ 3.5 mm (0.14 in) midspan} deflection	22 kilonewtons (kN)
THE PREDICTED ULTIMATE LOAD. This is P _{est @ ult}	47 kilonewtons (kN)

Anexo 4
Hoja de costos equipo USFQ2



ACI SPRING 2013 CONVENTION - STUDENT "FRP COMPOSITES" COMPETITION
Official Mix Design and Cost Form (Page 1 of 2)

An electronic version of this form must be submitted by Apr. 2, 2013 to students@concrete.org.
A hardcopy of this form must be submitted with the test specimens on April 14, 2013.

By submitting this form, I, the faculty advisor, acknowledge this information is correct. The students have adhered to the contest rules, and the specimens have been made and cured in compliance with the rules.

School: UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO Faculty Advisor: DR. FABRICIO YEPEZ, Ph.D.

Date Cast: March 27 Beam Mark: USFQ 2 Batch Size (cubic feet): 0.22

Name 1:	ANDRES ROBALINO
Degree/Graduation Date:	jun-14
Name 2:	ALEX PACHECO
Degree/Graduation Date:	jun-14
Name 3:	RUBEN MANCHENO
Degree/Graduation Date:	may-14
Name 4:	DAVID CHAVEZ
Degree/Graduation Date:	ene-14
Name 5:	JUAN PAZ
Degree/Graduation Date:	ene-14

FOR MIX DESIGNS IN SI UNITS, USE THE "SI UNITS CONVERSION" PAGE TO CONVERT TO US UNITS

Concrete Materials				Mix Design for 1 Cubic Yard		
Material	Brand	Description	Specific Gravity	Volume (cf)	SSD Weight (lbs)	Measured Batch Weight (lbs)
Coarse Aggregate	Toachi River	Basaltic stone 3/8" max.	2.72	9.29	1,576	12.9
Sand	Toachi River	Basaltic stone 2mm max	2.75	6.16	1,055	8.7
Cement ASTM C150	Chimborazo	Portland Type II	3.14	5.40	1,060	8.7
Silica Fume	REOMAC-BASF	ASTM C240	2.20	0.86	118	1.0
Water			1.00	4.54	283	2.3
Admixture	BASF Glenium 3400NV	polycarboxilate	1.10	0.24	17	0.0
Air		1.9% of total volume		0.51		
TOTAL MEASURED BATCH WEIGHT				27.00	4,109	33.6

Weight from mix design calculations should equal 27.00 cf. Measured Batch Weight is the weights of all materials used to mix your concrete (excluding a

Chemical Admixtures				
Type	Brand	Description	Dosage (oz/cwt)	Batch Dosage (oz)
High range water reducer	BASF Glenium N3400NV	ASTM C240	22.23	1.9

Water-Cement Ratio: 0.24 Slump (in): 7.10 Density (pcf): 152.2

7 Day Strength (psi) Cylinder 1 11175.15 Cylinder 2 10544.24 Cylinder 3 11397.06

FRP Reinforcing Materials			
Type	Brand	Description	Number of Pieces Used
GFRP bar standard modulus	Hughes Brothers Aslam 100	glass fiber reinforcement bar	1.00



ACI SPRING 2013 CONVENTION - STUDENT "FRP COMPOSITES" COMPETITION
Official Mix Design and Cost Form (Page 2 of 2)

An electronic version of this form must be submitted by Apr. 2, 2013 to students@concrete.org.

A hardcopy of this form must be submitted with the test specimens on April 14

ON THIS PAGE, FILL IN ONLY THE YELLOW CELLS

FOR SI MIX DESIGNS, USE "SI UNITS CONVERSION" PAGE, THEN ENTER CONVERTED VALUES HERE

Concrete Materials	Cost/Unit	Unit	Batch Quantity (lbs)	Cost/Batch
Coarse Aggregate	\$19.00	Ton	12.9	\$0.12
Fine Aggregate	\$12.00	Ton	8.7	\$0.05
Lightweight Aggregate	\$120.00	Ton	0.0	\$0.00
Portland Cement meeting ASTM C150	\$110.00	Ton	8.7	\$0.48
Blended Cement meeting ASTM C595	\$110.00	Ton	0.0	\$0.00
Blended Cement meeting ASTM C115	\$110.00	Ton	0.0	\$0.00
Fly Ash meeting ASTM C618	\$55.00	Ton	0.0	\$0.00
Slag meeting ASTM C989	\$95.00	Ton	0.0	\$0.00
Silica Fume meeting ASTM C1240	\$500.00	Ton	1.0	\$0.25
Water	\$10.00	1,000 gallons	2.3	\$0.00
TOTAL BATCH WEIGHT & CONCRETE MATERIAL COST			33.6	\$0.91

Chemical Admixtures	Cost/Unit	Unit	Batch Quantity (oz)	Cost/Batch
Air-Entrainment	\$3.85	Gallon	0.0	\$0.00
Normal Water Reducer	\$4.25	Gallon	0.0	\$0.00
Mid-Range Water Reducer	\$7.75	Gallon	0.0	\$0.00
High-Range Water Reducer (non-polycarboxylate)	\$8.50	Gallon	0.0	\$0.00
High-Range Water Reducer (polycarboxylate)	\$15.00	Gallon	1.9	\$0.22
Retarder	\$8.25	Gallon	0.0	\$0.00
Accelerator (non-chloride)	\$7.75	Gallon	0.0	\$0.00

FRP Reinforcing Materials	Cost/Unit	Unit	Quantity (pieces)	Cost/Structure
#4 GFRP Reinforcing Bars - standard modulus	\$1.75	Pieces	1	\$1.75
#4 GFRP Reinforcing Bars -High Modulus (HM)	\$2.44	Pieces	0	\$0.00
GFRP Grid - 39" length of C12 with 4 strands in 6" width	\$2.03	Pieces	0	\$0.00
Material Cost Subtotal:				\$2.88

Formwork Penalties	Enter 1 for yes, 0 for no	Formwork Multiplier	Formwork Cost
Is cross section rectangular?	1	If Rectangular = 1; If not = 1.1	\$0.00
Is cross section prismatic?	1	If Prismatic = 1; If not = 1.1	\$0.00
Formwork Cost Subtotal:			\$0.00

Sustainability Credits			Points Awarded	
Percent Cement	25.89%	Less than 15% = 1; Less than 10% = 2; Less than 5% = 3	0.0	
Percent Flyash	0.00%	More than 20% = 1; more than 30% = 2; more than 40% = 3	0.0	
Percent Slag	0.00%	More than 20% = 1; more than 35% = 2; more than 50% = 3	0.0	
Percent Silica Fume	10.31%	More than 5% = 1; more than 10% = 2	2.0	
Total Sustainability Points			2.0	
Sustainability Credit Multiplier:			0.98	

Final Cost = Material Cost Subtotal X Sustainability Credit Multiplier + Formwork Cost	\$2.82
---	---------------

PREDICTED LOADS – Report in kilonewtons (kN)	
DIVIDE PREDICTIONS MADE IN LBS BY 224.8 TO GET THE PREDICTIONS IN kN TO ENTER BELOW	
DEFLECTION OF 3.5 mm (0.14 in). This is $P_{est @ 3.5 \text{ mm (0.14 in) midspan}}$ deflection	22 kilonewtons (kN)
THE PREDICTED ULTIMATE LOAD. This is $P_{est @ ult}$	47 kilonewtons (kN)